

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkötekniikan osasto

Timo Marttinen

PAPERIRADAN KIREYDENHALLINNAN SIMULOINTIMALLI

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 1.6.1993

Työn valvoja

Aarne Halme

TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO

19153

Työn ohjaaja

Janne Ojala



Tekijä:	Timo Marttinen	
Työn nimi:	Paperiradan kireydenhallinnan simulointimalli	
Päivämäärä:	27.05.93	Sivumäärä: 85
Osasto:	Sähkötekniikan osasto	
Professuuri:	Automaatiotekniikka	
Työn valvoja:	prof. Aarne Halme	
Työn ohjaaja:	dipl.ins. Janne Ojala	
<p>Tässä työssä tarkastellaan paperiteollisuuden linjakäytöissä esiintyviä kireyssäädön häiriöitä sekä toimenpiteitä näiden vähentämiseksi. Tarkastelun kohteena on kone-suuntaisen ratakiereyden hallinta, jota säädetään sähkökäyttöjen ja näitä ohjaavan automaatiojärjestelmän avulla. Ratakiereyteen vaikuttavalle prosessille on toteutettu simulointimalli, jota voidaan muokata tutkittavaa järjestelmää vastaavaksi.</p> <p>Työssä on esitelty lyhyesti erilaiset paperinjalostuskoneet sekä niissä käytettävä sähkökäyttöjärjestelmä. Linjakäyttöjen ohjausjärjestelmää on esitelty tarkemmin ratakiereyden hallintaan vaikuttavien tekijöiden osalta, lisäksi on käsitelty kireyden mittaukseen liittyviä häiriötekijöitä. Tämän jälkeen on käsitelty paperin ominaisuuksia sekä paperiradan ja telan välistä vuorovaikutusta prosessin käyttäytymisen ymmärtämiseksi. Ratakiereyden muodostumista on pohdittu niin staattisessa kuin dynaamisessa tilanteessa. Ratakiereyteen liittyvälle prosessille on esitetty Laplace-tason siirtofunktiot, sekä kuvattu prosessin muodostaman värähtelevän systeemin ominaisuuksia. Tämän jälkeen on käsitelty ratakiereyden hallintaan liittyviä tyypillisiä häiriötekijöitä.</p> <p>Työssä toteutettu kireydenhallinnan simulointimalli on johdettu systeemin fysikaalisista riippuvuuksista ja toteutettu Simulink/Matlab-ohjelmistolla. Tehdasmittauksilla on verrattu mallin yhtäpitävyyttä todellisen järjestelmän käyttäytymisen kanssa. Tämän jälkeen on tutkittu kireyssäädön kehitysmahdollisuuksia sekä havainnollistettu simuloinnin käyttöä tuotekehityksen apuvälineenä tutkimalla adaptiivista kireyssäätöä sekä tilatakaisinkytketyn säädön mahdollisuuksia.</p>		
Avainsanat:	paperiteollisuuden linjakäytöt, kireyssäätö, konesuuntainen ratakiereys, monimoottorikäyttö, simulointi	

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS

Author:	Timo Marttinen	
Title:	Simulation model for paper web tension control	
Date:	27.05.93	Number of pages: 85
Faculty:	Electrical Engineering	
Professorship:	Automation Technology	
Supervisor:	Prof. Aarne Halme	
Instructor:	Janne Ojala, M.Sc. (Eng.)	
<p>This thesis deals with the tension control disturbances in paper industry sectional drives, as well as means to reduce their effects. The main interest is the control of the longitudinal paper tension, which is controlled with the drive system and the coordinating automation system. A simulation model is created for the process which influences the web tension. The model can be adjusted to correspond to the desired system.</p> <p>The different types of paper production machines are described shortly, as well as the drive system used in controlling them. The control system for sectional drives is presented, focusing on the factors that affect tension control. Furthermore, the factors affecting tension measurement are described. Paper properties and interaction between paper web and roll are considered in order to understand the process behaviour. Paper web behaviour under static and dynamic conditions are studied. Laplace-plane transfer functions are presented for the oscillating system, and the characteristics of the system are described. After this, typical disturbing factors for the tension control are dealt with.</p> <p>The simulation model is based on the physical interdependences of the system and is implemented using Simulink/Matlab-software package. On-site measurements were carried out to compare compatibility of the model with a real life system. After this, the possibilities to develop tension control are studied with the help of simulation. The use of adaptive tension control and state feedback control are considered.</p>		
Keywords:	paper industry sectional drives, tension control, longitudinal tension, multi-motor drive, simulation	

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	II
ABSTRACT	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
ALKULAUSE	V
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	VI
 1. JOHDANTO.....	 1
 2. PAPERITEOLLISUUDEN LINJAKÄYTÖT	 3
2.1 Yleistä	3
2.2 Tavallisimmat paperinjalostuskoneet.....	4
2.2.1 Paperikoneet	4
2.2.2 Päälystyskoneet.....	5
2.2.3 Jälkikäsittelykoneet.....	6
2.3 Sähkökäyttöjärjestelmä.....	7
2.3.1 Taajuusohjattu oikosulkumoottori	8
2.3.2 Tasavirtakäyttö	10
2.4 Sääto- ja ohjausjärjestelmä.....	11
2.4.1 Sovellusohjain	12
2.5 Sääto menetelmät.....	13
2.5.1 Nopeussääto.....	15
2.5.2 Momenttisääto	17
2.5.3 Kireyssääto	18
2.5.4 Rullaimien ohjaukset	21
2.6 Kireyden mittaus voima-anturilla.....	22
 3. KIREYSSÄÄDETTY PAPERIKONEKÄYTTÖ	 26
3.1 Paperiradan ominaisuudet.....	26
3.1.1 Paperiradan kimmo-ominaisuudet.....	27
3.2 Elastisen materiaalin käyttäytyminen.....	28
3.2.1 Radan ja telan vuorovaikutus	28
3.3 Kireyden muodostuminen kahden telan välillä	29
3.3.1 Kireyden käyttäytyminen muutostilanteessa.....	32
3.4 Nopeussäädetyn ryhmän dynamiikka	35
3.5 Kireyssäädetty ryhmä	38
3.6 Häiriötekijät	39
3.6.1 Rullainkäyttöjen häiriöt	39
3.6.2 Päälystysterät ja puhdistuskaavarit	41
3.6.3 Pyörimistaajuiset häiriöt	43
3.6.4 Akselivärähtely	44
3.6.5 Välykset voimansiirrossa	46
3.6.6 Luisto	46
3.6.7 Muut häiriöt.....	48

4.	KIREYDENHALLINNAN SIMULOINTIMALLI	50
4.1	Yleistä prosessin mallintamisesta	50
4.1.1	Ei-parametriset menetelmät	51
4.1.2	Parametriset menetelmät	52
4.2	Toteutustyökalu	53
4.3	Kireyssäädetyin systeemin malli ja toteutus	53
4.3.1	Mekaanisen järjestelmän malli	55
4.3.2	Ohjausjärjestelmän malli	57
4.4	Simulointiohjelman toiminnan kuvaus	58
4.4.1	Simulointimallin rajoituksista	58
4.5	Tehdasmittaukset ja mallin vastaavuus	59
4.5.1	Sellunkuivatuskone KK2	59
4.5.2	Uudelleenrullainkone URK	60
4.6	Mittaustulokset	62
4.7	Pohdintoja mittaustuloksista	65
5.	KIREYSSÄÄDÖN TUTKIMINEN MALLIN AVULLA	66
5.1	Säädetyin systeemin ominaisuudet	66
5.1.1	Kireyssäädölle asetettavat vaatimukset	67
5.1.2	Käytännön viritysongelmat	67
5.2	Kireyssäädön kehittäminen simulointimallin avulla	68
5.2.1	Ratanopeuden suhteen adaptoitu kireyssäätö	68
5.2.2	Rullakoon suhteen adaptoitu kireyssäätö	71
5.2.3	Tilasäätö	73
5.2.3.1	Simuloinnit tilasäädöllä	77
5.3	Muut säätömenetelmät	78
5.4	Pohdintoja	79
6.	YHTEENVETO	80
	LÄHDELUETTELO	82

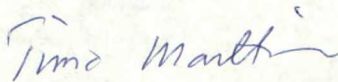
LIITE:

1. Ratakireyden askelvastekoe

ALKULAUSE

Tämä työ on tehty ABB Strömberg Drives Oy:n stipendin turvin Helsingin Pitäjänmäellä. Työn valvojana toimi professori Aarne Halme ja ohjaajana dipl.ins. Janne Ojala. Heille lausun parhaimmat kiitokseni työn aikana saamistani neuvoista ja ohjauksesta. Työ on tehty pääosin Industrial Drive Systems-divisioonan Pulp & Paper-osastolla, jonka henkilökuntaa kiitän saamistani neuvoista sekä erinomaisesta työskentelyilmapiiristä. Lopuksi tahdon kiittää vanhempiani koko opiskeluaikani saamistani tuesta ja kannustuksesta.

Helsingissä 25. toukokuuta 1993



Timo Marttinen

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Käytetyt symbolit

A_0	poikkipinta-ala [m^2]
E	kimmomoduuli [N/m^2], sähkömotorinen voima [V]
e	neperin luku
F	voima [N]
f	taajuus [Hz]
G	siirtofunktio
g	gravitaatiovakio
I	sähkövirta [A]
i	välityssuhde
J	hitausmassa [kgm^2]
k	kimmokerroin [N], vakio
L	induktanssi [H], ratavälin pituus [m]
l	rataleveys [m]
M	momentti [Nm]
m	massa [kg]
N	pinnan normaalin suuntainen voima [N]
n	pyörimisnopeus [rpm]
P	teho [W]
p	napapariluku
q	viivapaine [N/m]
R	resistanssi [ohm]
r	säde [m]
s	suhteellinen jättämä, Laplace-operaattori
T	ratakireys [N/m], vääntömomentti [Nm]
t	aika [s]
U	jännite [V]
v	nopeus [m/s]
V_0	ratanopeus [m/s]
X	reaktanssi [ohm]
x	etäisyys [m]
z	diskreetti siirto-operaattori
ε	suhteellinen venymä
I	yksikkömatriisi

μ	kitkakerroin
θ	kiertymiskulma [rad]
σ	jännitys [N/m ²]
τ	aikavakio [s]
ω	kulmataajuus [rad/s]
ξ	vaimennuskerroin

Käytetyt lyhenteet

ABB	Asea Brown Boveri, eräs kansainvälinen sähkötekniikan alan yritys
ARMAX	Auto-Regressive Moving Average eXtraneous variable, eräs matemaattinen identifiointimenetelmä
ARX	Auto-Regressive eXtraneous variable, eräs matemaattinen identifiointimenetelmä
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
ETFE	Empirical Transfer Function Estimate, eräs matemaattinen identifiointimenetelmä
I/O	Input / Output, tulo / lähtö
LWC	Light Weight Coated, kevyesti päällystetty paperilaatu
M	Moottori
OP	Ohjauspaneeli
PC	Personal Computer, henkilökohtainen tietokone
PID	Proportional – Integral–Derivative, säätömenetelmä
RS	Ryhmsäätäjä
SELMA	Strömberg ELectronic Microcomputer Automation, eräs digitaalinen automaatiojärjestelmä
SK	Sovitinkortti
SO	Sovellusohjain
VO	Väyläohjain

1. JOHDANTO

Pyrkimykset tehostaa pääomakustannuksiltaan kalliiden paperikoneiden tuotantoa sekä säästää paperin raaka-aineita asettavat myös yhä suuremmat vaatimukset tuotantokoneiden sekä niihin liittyvien käyttöjärjestelmien suunnittelulle ja toiminnalle. Viimeisen neljänkymmenen vuoden aikana on esimerkiksi LWC-koneen keskimääräinen tuotantonopeus noussut paperikoneella n. 600 m/min:sta 1200 m/min:iin, päällystyskoneella 800:sta jopa 1400 m/min:iin rataleveyden kasvaessa 4,7 metristä 8,5 metriin. Samalla valmistettavien papereiden neliöpainot ovat pienentyneet kuituraaka-aineen säästämiseksi. Lisäksi koneella ajettavien eri paperilaatujen määrä on kasvanut ja tuotannossa pyritään pienempiin eriin ja lyhyempiin lajinvaihtoihin, mikä vaatii koneenohjaukselta entistä enemmän joustavuutta.

Paperintuotantokoneiden sähkökäyttöille ja niitä ohjaavalle järjestelmälle edellä mainitut tekijät asettavat suuremmat vaatimukset tarkkuuden ja dynaamisten ominaisuuksien sekä käsiteltävän tietomäärän ja prosessointinopeuden suhteen, jotta paperi kulkisi moitteettomasti koko tuotantokoneen läpi. Paperi on materiaalina herkkää prosessissa tapahtuville häiriöille ja kalliiden tuotantokatkojen sekä laatuvirheiden minimoiminen on ensisijaisen tärkeää.

Toimivan säätöjärjestelmän suunnittelu ja toteutus edellyttää prosessin fysikaalisten ja säätötekniisten ominaisuuksien hyvää tuntemusta. Vaikka prosessi sisältääkin monia tuntemattomia tekijöitä – joilla on usein myös varsin keskeinen merkitys – on tärkeää tuntea reaali maailman ilmiöiden ja epäideaalisuuksien järjestelmälle asettamat rajoitukset. Ratakireyden vaihtelut aiheuttavat pääosan katkoista sekä erilaisia laatuhäiriöitä. Etenkin päällystyskoneilla kireyssäätöjärjestelmän virittäminen toimivaksi vaatii runsaasti aikaa käyttöönoton yhteydessä. Lisätietämyksellä voidaan tietyiltä ongelmatilanteilta välttyä ja käyttöönottoaikaa lyhentää. Kireydenhallinnan ongelmaa on tutkittu teollisuudessa sekä tieteellisissä yhteisöissä, analogisia ongelmia löytyy teollisuudesta lähinnä painokoneiden parista sekä muovi-, metalli- ja tekstiiliteollisuudesta.

Prosessin simulointimallin avulla voidaan kuvata ja havainnollistaa niitä ilmiöitä ja ominaisuuksia, joita prosessissa esiintyy. Simuloinnilla on erityisesti etua silloin, kun kohdeprosessin tuotannollisten vaatimusten takia tehdaskokeita voidaan järjestää vain rajoitetusti. Paperiteollisuuden koneet ovat rakenteeltaan ja mitoitukseltaan

yksilöllisiä, samoin niissä toteutettu ohjausjärjestelmä. Prosessia ja ohjausjärjestelmää kuvaavan mallia voidaan käyttää työkaluna kehitettäessä säätöjärjestelmiä sekä apuna määriteltäessä säätöparametrejä edeltä käsin käyttöönottovirityksen helpottamiseksi. Muodostamalla simulointimalli todellista ympäristöä vastaaviksi osakokonaisuuksiksi, saadaan mallista joustava ja sitä voidaan soveltaa toisistaan poikkeaviin ratkaisuihin. Simulointia voidaan käyttää sen havainnollisuuden vuoksi suunnittelun ja tuotekehityksen lisäksi myös koulutuksessa, jolloin myös mallin käyttöliittymän tulisi olla havainnollinen ja helppokäyttöinen.

2. PAPERITEOLLISUUDEN LINJAKÄYTÖT

2.1 Yleistä

Paperikoneen telat ja sylinterit muodostavat kuljetinjärjestelmän, joiden välisenä mekaanisena yhdyssiteenä toimii koneen läpi kuljetettava paperi. Katkoille altis paperi asettaa tiukat vaatimukset kuljetinjärjestelmän toiminnalle sekä ohjaukselle. Toimilaitteilta vaaditaan tarkkuutta ja hyvää dynamiikkaa sekä ylemmän tason ohjaukselta nopeutta ja luotettavuutta.

Paperikone on jaettu käyttöteknisesti ryhmiin, joiden nopeutta toisiinsa nähden on voitava tietyissä rajoissa säätää. Vanhemmat käyttöjärjestelmät olivat valta-akselikäyttöjä, joissa voimansiirto toteutettiin yhteisen käyttöakselin välityksellä ja hihnasiirtojen avulla voitiin asettaa telaryhmien välisiä nopeuseroja. Valta-akselikäytössä tarvittiin vain yksi moottori, joka jakoi tarvittavan tehon. *Monimoottorikäytöissä* teho muodostetaan useamman *käyttöryhmän* avulla. Käyttöryhmän muodostavat yksi tai useampi moottori, jotka syöttävät prosessiin tarvittavan mekaanisen energian. *Linjakäytöllä* tarkoitetaan monimoottorikäyttöä, jossa käyttöjen välisenä yhdyssiteenä toimii jokin mekaaninen tekijä, kuten paperiteollisuuskäytöissä paperirata ja huovat. Toimiakseen moitteettomasti vaatii tällainen systeemi ylemmän tason koordinoitua ohjauksen. Analogiatekniikkaan perustuvat monimoottorikäytöt olivat yleisiä vielä 1980-luvun alkuun, jolloin ensimmäiset digitaaliset ohjausjärjestelmät tulivat markkinoille. Nykyiset linjakäyttösovellukset toteutetaan pääasiallisesti monimoottorikäyttöjen ohjaukseen suunnitelluilla ohjausjärjestelmillä. Prosessiteollisuudessa tavanomaisesti käytettävät digitaaliset automaatiojärjestelmät eivät yleensä sovellu monimoottorisovelluksiin sähkökäyttöjen vaatiman nopean ohjauksen vuoksi.

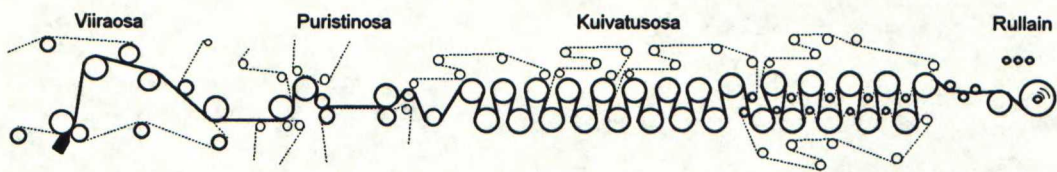
Vielä 1980-luvulle paperikoneiden linjakäytöt toteutettiin pääosin tasavirtatekniikalla, mutta taajuusmuuttajien nopean kehityksen myötä on vaihtovirtatekniikalla saavutettu tasavirtakäyttöjä vastaavat säätöominaisuudet.

Paperiteollisuuden lisäksi vastaavanlaisia linjakäyttösovelluksia löytyy muun muassa teräs-, muovi- ja tekstiiliteollisuudesta.

2.2 Tavallisimmat paperinjalostuskoneet

2.2.1 Paperikoneet

Paperikonetyyppejä on useita konevalmistajasta ja valmistettavasta paperilaadusta riippuen. Perinteisen tasoviirakoneen (ns. Fourdrinier–paperikone) lisäksi yleisiä ovat kaksoisviirarakenteiset koneet, joissa kuvan 2–1 mukaisesti massa ohjataan kahden liikkuvan viiran muodostamaan kitaan. Kartonkeja valmistetaan monitasoviirakoneilla, pehmopaperin valmistus vaatii myös erityisen konerakenteen.



Kuva 2–1. Kaksoisviirapaperikone.

Paperikone voidaan jakaa karkeasti neljään pääosaan: viiraosaan, puristinosaan, kuivatusosaan sekä rullaimeen. Viiraosalla tapahtuu paperin muotoutuminen kuitumatoksi. Perälaatikosta ohjattava lietesuihku suotautuu viiralla siten, että sen kuiva-ainepitoisuus puristinosalla saapuessa on noin 20%. Nykyaikaiset nopeat paperikoneet ovat yleensä kaksoisviirarainaimia, joissa massa ohjataan kahden vastakkaisen viiran muodostamaan rakoon. Puristinosaa koostuu yhdestä tai useammasta telaparin muodostamasta nipistä, joiden tehtävänä on poistaa vettä sekä vahvistaa kuitujen muodostamaa paperirainaa. Koska vedenpoisto on taloudellisinta puristinosalla, pyritään tasaisella nippipaineella mahdollisimman suureen kuiva-ainepitoisuuteen. Kuivatusosa on sekä pääoma- että käyttökustannuksiltaan paperikoneen kallein osa. Sen tehtävänä on poistaa rainaan jäljelle jäänyt vesi ennen paperin rullausta. Kuivatusosa muodostuu useista vesihöyryllä kuumennetuista kuivatussylinteriryhmistä, joiden lävitse paperiraina viedään kuivatushuovan tukemana. Paperi voidaan lisäksi päällystää kuivatusryhmien välissä tai kiillottaa eli kalanteroida ennen rullausta. Joissakin koneissa valmistuva paperi leikataan suoraan arkeiksi.

Jotta prosessia ei jouduttaisi pysäyttämään rullan tultua valmiiksi, suoritetaan rullanvaihto tuotantonopeudella erityisjärjestelyin. Paperikoneilla on yleisin ratkaisu poperullain, jolloin erillisen rullainsylinterin eli popesylinterin avulla pyöritetään valmistuvan rullan kehää. Valmistuva paperi rullataan tampuuriraudan ympärille ja rullan täytyessä uusi tampuurirauta kiihdytetään ratanopeuteen erillisellä alkukäynnistimel-

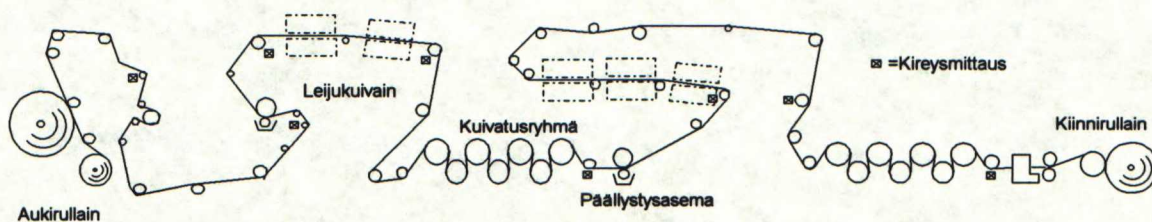
lä. Rullanvaihdossa paperi ohjataan uuden tampuurin ympärille ja paperin pää katkaistaan. Rullainsylinteri siirtyy pyörittämään uutta rullaa ja täyttynyt rulla poistetaan koneesta. /1/. Keskiörollauksessa ohjataan suoraan valmistuvan rullan akselimomenttia. Hyvä rullaustulos vaatii tasaisen ratakiireyden, joka voidaan toteuttaa kireys-säätöpiirin avulla tai vaihtoehtoisesti ohjata käyttöä momenttisäätöisesti. Huonosti muodostunut rulla siirtää ongelmia jälkikäsitteilykoneille aukirullauksen yhteydessä.

Paperikoneiden tuotantonopeudet vaihtelevat yleisesti välillä 300 – 1500 m/min muun muassa paperilajista riippuen, suurin este maksiminopeuden kasvattamiselle on paperin vaatima kuivatusteho.

2.2.2 Päällistyskoneet

Päällistyksellä parannetaan paperin laatua, varsinkin paino-ominaisuuksia, ja muokataan sitä käyttötarkoitukseensa paremmin sopivaksi. Paperi voidaan päällistää joko valmistuksen yhteydessä paperikoneella tai erillisellä kuvan 2–2 tyyppisellä päällistyskoneella. Kummallakin menetelmällä on omat etunsa ja haittansa, mutta molempia käytetään yleisesti. Erillispäällistuksen kiinteät kustannukset ovat luonnollisesti korkeammat, mutta tuotanto on joustavampaa, eikä se ole sidottu paperikoneen muuhun tuotantoon. Yleensä kartongit päällistetään konepäällistyskoneella, kun taas ohuemmat paperilaadut erillispäällistyskoneella. /2/.

Usein paperi esipäällistetään liimauspuristimessa, jolloin sen pinta saadaan tasaiseksi ja paperi paremmin vettä sietäväksi. Yleisimmin päällistuksen käytetään teräpäällistysasemia, joita on koneessa kaksi tai useampia. Paperi ajetaan useimmiten välirullaimen läpi paperikoneen vianilmaisimen havaitsemien reikien paikkaamiseksi ennen erillispäällistystä. Paperi rullataan auki aukirullaimessa, josta se johtotelojen ohjaamana johdetaan päällistysasemalle. Usein paperi esikuivataan heti päällistuksen jälkeen infrapunakuivaimilla ja tämän jälkeen leijukuivaimilla, jonka jälkeen paperi viedään yhden tai useamman kuivatussyylinteriryhmän läpi. Paperin kumpikin puoli päällistetään ja kuivataan erikseen, hienoimmissa paperilaaduissa päällistys suoritetaan useampaan kertaan. Päällistetty paperi rullataan kiinnirullausasemalla.



Kuva 2–2. Paperin päällystyskone.

Päällystyskoneella paperin päänvienti aukirullaukselta kiinnirullaukseen on hankala ja aikaavievä toimenpide. Tämän vuoksi aukirullauksen rullanvaihto suoritetaan tuotantonopeudessa ns. *lentävää liimausta* käyttäen. Kun vanha rulla alkaa lähestyä loppuaan, kiihdytetään uusi ensioasemassa oleva rulla samaan kehänopeuteen koneessa olevan rainan kanssa. Liimaustelan avulla vanha paperi painetaan nopeasti uuden rullan pintaa vasten, jossa on etukäteen valmisteltu liimasauma. Sauman tullessa telan kohdalle tarttuu paperin kärki vanhaan rataan ja vanha paperi lyödään katkaisuterällä poikki. Jo lähes tyhjä rulla jarrutetaan toisiokäytöllä seisauksiin ja kun uusi rulla on pienentynyt puoleen koostaan, siirretään se toisioasemaan. Sauma ajetaan koneen läpi vanhalle rullalle, jonka jälkeen kiinnirullauksessa suoritetaan rullanvaihto. Päällystetyn paperin kiinnirullaus tapahtuu kuten paperikoneellakin. Aukirullauskäytöstä käytetään nimitystä jarrugeneraattori, koska ryhmää ajetaan jarrutavalla momentilla ratakireyden aikaansaamiseksi.

Päällystyskoneen tuotantonopeuden on oltava korkeampi kuin paperikoneen, jotta sillä ehditään päällystää paperikoneen tuotanto.

2.2.3 Jälkikäsittelykoneet

Muita jälkikäsittelykoneita ovat pituusleikkurit, välirullaimet ja kalanterit. Leikkureissa koneelta valmistuva konerulla leikataan pienemmiksi asiakasrulliksi tampo-uriraudalta hylsille. Kantotelaleikkuri on yleisin leikkurityyppi. Siinä valmistuva rulla muodostuu kahden kantotelan kannattelemana ja syntyvän rullan kireyteen voidaan vaikuttaa rata-
kireyden lisäksi kantotelojen momenttiero ja painotelan painetta säätelemällä.

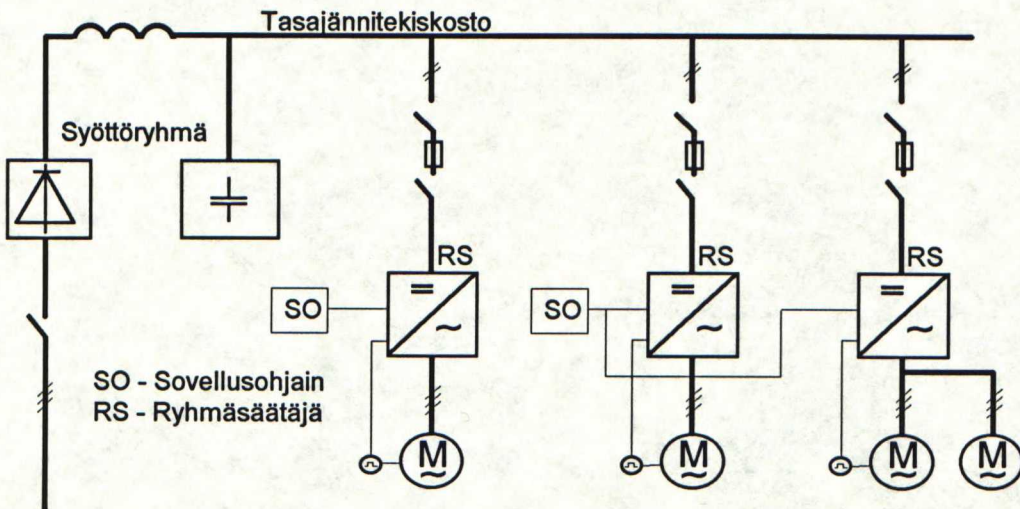
Välirullaimella voidaan paikata havaitut reiät ja täplät sekä poistaa laadultaan huono paperi rullasta. Kalantereissa kiillotetaan valmistunut päällystetty tai päällystämätön paperi erityyppisissä kalanterinipeissä pintaominaisuuksien parantamiseksi ja pape-

rin paksuusprofiilin tasoittamiseksi. Pehmopaperileikkureissa voidaan aukirullata myös kahta tai useampaa konerullaa, jolloin saadaan useampikerroksista pehmopaperia puristamalla kerrokset kalanterinipissä yhteen. Auki- ja kiinnirullauksessa ei voida käyttää ratakiireyttä hyödyksi, koska tällöin pehmopaperin kreppaus purkautuisi.

Välirullaimien ja leikkureiden mitoitusnopeudet uusilla koneilla ovat yli 2000 m/min, käytännön tuotantonopeudet ovat 1800–2000 m/min.

2.3 Sähkökäyttöjärjestelmä

Linjakäyttöjen sähkökäyttöjärjestelmän muodostavat syöttöryhmät, ryhmäsäättäjät sekä tasasähkö- tai oikosulkumoottorit. Sähkökäyttöjen tehtävänä on tuottaa mekaaninen energia, joka tarvitaan kuljettamaan materiaali koneen läpi. Syöttöryhmien kautta ryhmäsäättäjät saavat tarvitsemansa sähkötehon. Kuvassa 2–3 on esitetty tyypillinen syöttöryhmäkaavio.



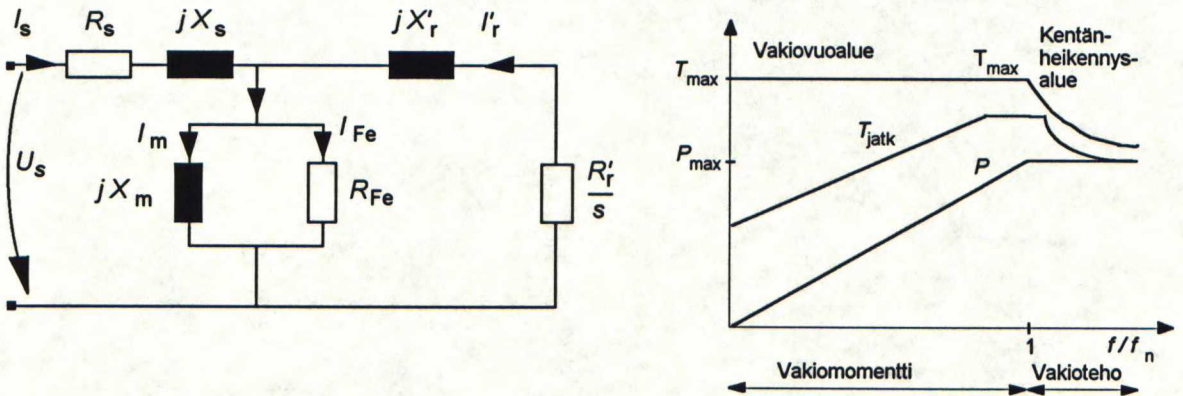
Kuva 2–3. Vaihtosähkökäyttöisen järjestelmän syöttöryhmäkaavio.

Käyttömootoreina käytetään joko tyristorisuuntaajilla ohjattuja erillismagnetoituja tasavirtamootoreita tai taajuusmuuttajaohjattuja kolmivaiheoikosulkumootoreita. Moottorit varustetaan tavallisesti pulssiantureilla pyörimisnopeuden mittaamiseksi. Vaikka tasavirtakäytöt hallitsivat pitkään linjakäyttösovelluksissa, on oikosulkumoottorien suosio ollut viimeisen vuosikymmenen aikana nopeasti kasvussa nopeasti kehittyneen taajuusmuuttajatekniikan sekä oikosulkumoottojen kestävyys- ja vähäisen huollontarpeen vuoksi.

Käytön toimintaa ohjaa digitaalinen ryhmäsäättäjä, joka säättää ohjelmallisesti moottorin nopeuden ja momentin, tyristorien sytytyksen sekä hoitaa käytön sisäisen ohjauslogiikan ja ajodiagnostiikan. Ryhmäsäättäjä saa ainoastaan ohjearvot sekä käynnistys- ja pysäytyskäskyt sarjaliikenteen kautta ylemmän tason sovellusohjaimelta. Ryhmäsäättäjä voi sisältää ohjelmallisesti vaativiakin sovelluskohtaisia toimintoja, paperikonekäytöissä tällaisia voivat olla esimerkiksi inertian kompensointi sekä akselivärähtelyn identifiointi ja vaimennus.

2.3.1 Taajuusohjattu oikosulkumoottori

Kuvassa 2–4 on esitetty oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä. Staattorivirta I_s synnyttää koneen ilmapäliin pyörivän magneettikentän, joka leikkaa roottorikäämityksen johtimia synnyttäen roottorivirran I_r . Virta pyrkii vastustamaan magneettikentän pyörimistä. Virta I_s tekee roottorista sähkömagneetin, joka pyörii staattorikentän suuntaan. Roottori pyörii aina magneettikenttää hitaammin, sillä muuten ilmapäliivuo ei synnyttäisi roottorivirtaa eikä pyörimistä tapahtuisi. Kentän ja roottorin pyörimisnopeuden suhteellista eroa kuvataan suhteellisella jättämällä s /3/.



Kuva 2–4. Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä ja taajuusohjatun oikosulkukoneen momenttikäyrä.

Epätahtikoneen pyörimisnopeudelle voidaan kirjoittaa kaava

$$n = \frac{f}{p} - \Delta n \quad (2.1)$$

missä f on syöttötaajuus, p napapariluku ja Δn absoluuttinen jättämä. Nopeutta voidaan siis säätää muuttamalla syöttötaajuutta f , jättämää Δn tai portaitaisesti napaparilukua p . Jatkuva ja häviötön säätö saadaan aikaan syöttötaajuutta muuttamalla. Taajuusohjattu oikosulkumoottori voi toimia myös generaattorina ilman että virran suuntaa tarvitsee kääntää – siirtyminen saadaan aikaan muuttamalla jättämä negatiiviseksi, mikä voidaan toteuttaa täysin elektronisesti.

Taajuusohjatusta oikosulkumoottorista saatava hetkellinen huippumomentti on 2–3 kertaa maksimimomentin suuruinen. Moottoria käytetään taajuusohjattuna tavallisesti huippumomenttien välisellä alueella. Vakiovuoalueella, joka ulottuu koneen nollanopeudesta nimellisnopeuteen, ilmavälivuo pyritään pitämään vakiona, mikä takaa muuttumattoman momenttikäyrän. Käytännössä tämä toteutetaan pitämällä syöttötaajuuden f ja syöttöjännitteen U suhde vakiona. Tällöin magnetointivirta I_m ja siten vääntömomentti pysyy vakiona. Koska pienillä taajuuksilla staattoriresistanssi R_s kuluttaa suhteessa suuremman osan syöttöjännitteestä, nostetaan tällöin syöttöjännitteen osuutta eli käytetään *IR-kompensointia*.

Kun siirrytään nimellisnopeuden yläpuolelle, pidetään syöttöjännite nimellisenä jolloin ilmavälivuo pienenee, samoin magnetointivirta I_m . Tällöin kuormitetussa moottorissa roottorivirta kasvaa ja moottori kehittää lähes vakiotehon. Moottorin sanotaan toimivan kentänheikkensalueella, jolloin moottorin antama vääntömomentti pienenee ja teho pysyy vakiona. /4/.

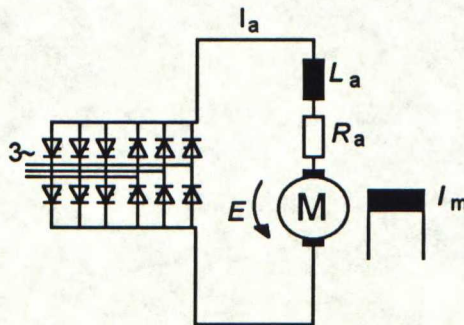
Vaihtosähkökäyttöä voidaan ohjata joko skalaarisäätöisinä tai vektorisäätöisinä. Skalaarisäädössä pyörimisnopeutta säädetään syöttötaajuutta muuttamalla. Kun moottori varustetaan nopeusmittauksella, voidaan sitä ohjata nopeussäädetyksi. Vaa-
tivissa käytöissä käytetään vektorisäätöä, jolloin päästään tasasähkökoneen veroiseen dynamiikkaan. Nopeussäätäjä antaa ohjearvon ja pulssianturilta saadun oloarvon perusteella momenttiohjeen momenttisäätäjälle. Oikosulkumoottorin momentti on virran ja roottorivuon vektoritulo. Momentin säätö edellyttää siten moottorivirtojen mittaamista, joista roottorivuomallin perusteella identifioidaan vuon ja momentin suuntaiset vektorit I_q ja I_d . Näiden avulla säädetään taajuusmuuttajan lähtöjännitettä ja syöttötaajuutta vaaditun vuon ja momentin aikaansaamiseksi. Vektorisäädön periaate on esitetty luvun 2.5.2 kuvassa 2–12. Kun taajuusmuuttajan antama nimellisvirta on hieman moottorin nimellisvirtaa suurempi, on moottorissa syntyvä vääntömomentti T_m likimain verrannollinen taajuusmuuttajan syöttämään virtaan I_t kaavan 2.2 mukaisesti

$$T_m = \frac{I_t}{I_{m,n}} T_{m,n} \quad (2.2)$$

missä $T_{m,n}$ ja $I_{m,n}$ ovat moottorin nimellismomentti ja -virta.

2.3.2 Tasavirtakäyttö

Kuvassa 2–5 on esitetty vierasmagnetoidun tasasähkökoneen kaaviokuva. Magnetointi- ja ankkurikäämitystä syötetään tasajännitteellä ja moottorin nopeutta voidaan helposti säätää näiden jännitteiden avulla. Tasasähkökoneen vääntömomentti on suoraan verrannollinen ankkurivirtaan I_a jota ohjataan tyristorisillan avulla. Kaksisuuntaisella sillalla saadaan aikaan nelikvadranttikäyttö, jolloin moottori voi toimia myös generaattorina jarruttaen verkkoon. Ankkurivirran suunnanvaihdosta johtuva sillanvaihto aiheuttaa 5...10 ms sekunnin suuruisen viiveen momentin suunnanvaihdossa. Normaalisti moottorin magnetointivirta I_m on vakio. Säättämällä magnetointivirtaa saadaan kuitenkin edullisemmalla mitoituksella riittävän laaja kierroslukualue. Tällöin kone toimii kentänheikennysalueella oikosulkumoottorin tavoin.

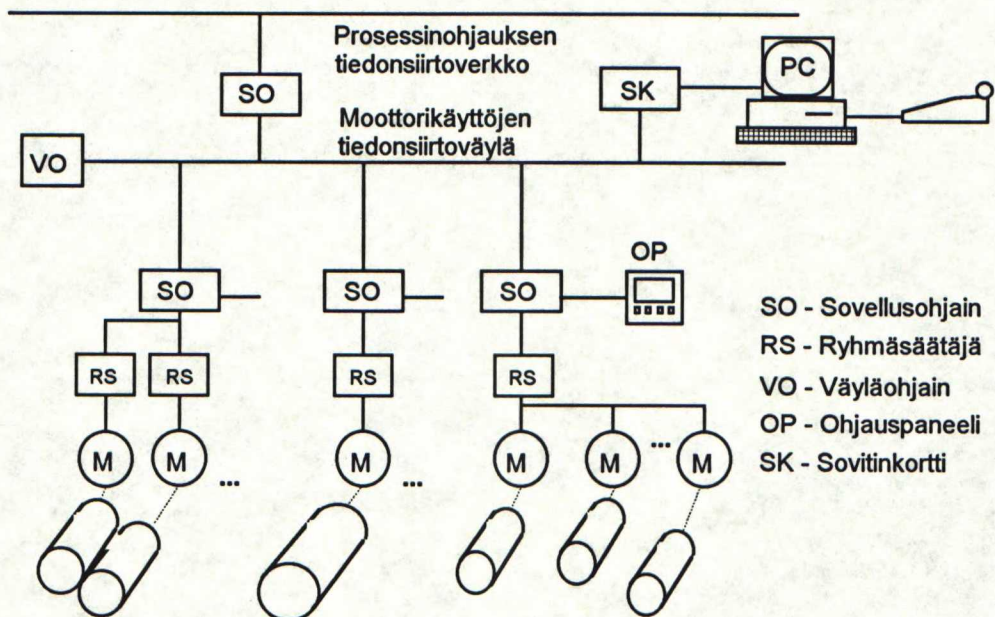


Kuva 2–5. Tasasähkökoneen kaaviokuva.

Tasasähkökoneita on perinteisesti käytetty tarkkaa nopeudensäätöä vaativissa koh-teissa. Niiden ohjaus on suhteellisen helppoa ja suuntaajajyksikön kustannukset pienet. Tasasähkökoneen moottorirakenne on kuitenkin mutkikas ja kallis, sekä moottorin hiiliharjat ja kommutaattori vaativat toistuvaa huoltoa. /3/.

2.4 Säästö- ja ohjausjärjestelmä

Linjakäytön ohjausjärjestelmän tehtävänä on ohjata toimilaitteita siten, että ne toimivat prosessin edellyttämällä tavalla. Sähkökäyttöjä ohjaava automaatiojärjestelmä voi olla keskitetty, osittain hajautettu tai täysin hajautettu. Perinteistä keskitettyä järjestelmää ovat korvaamassa hajautetut järjestelmät. Kuvassa 2–6 on esitetty täysin hajautetun järjestelmän kaaviokuva. Siinä käyttöryhmien ylemmän tason ohjauksesta huolehtivat hajautetut sovellusohjaimet, jotka kommunikoivat yhden tai useamman ryhmäsäättäjän kanssa sekä muiden sovellusohjainten kanssa tiedonsiirtoväylän kautta. Osittain toimilaitteohjaukset tapahtuvat myös ryhmäsäättäjätasolla.



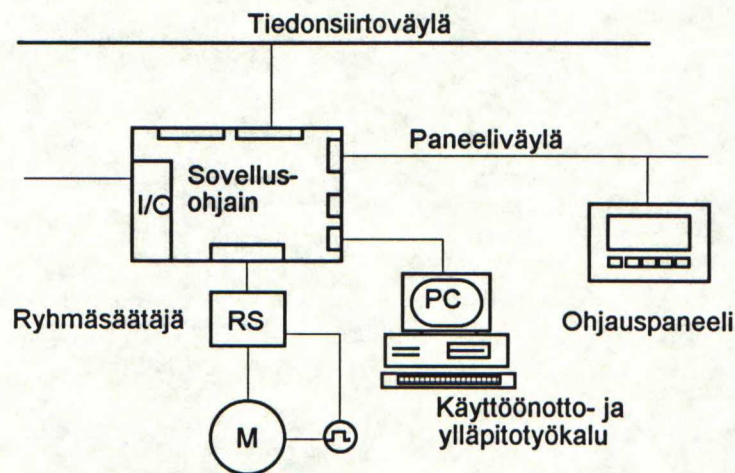
Kuva 2–6. Linjakäytön hajautettu ohjausjärjestelmä.

Hajautetulla järjestelmällä parannetaan yhteisten ohjausten suorituskykyä, jonka tarve lisääntyy tuotantokoneiden nopeuden kasvaessa ja käyttöryhmien määrän lisääntyessä. Ohjaustehtävien järkevällä hajauttamisella päästään tehokkaampaan sekä taloudellisempaan ratkaisuun: järjestelmän toiminnot voidaan jakaa sekä laitteistollisesti että ohjelmallisesti itsenäisesti toimiviin yksiköihin. Etuja ovat myös joustavuus muutoksille sekä kompakti rakenne. Täysin hajautettu järjestelmä asettaa kuitenkin tiettyjä erityisvaatimuksia yksiköiden välisen tiedonsiirron suhteen. /5/.

Tämän luvun loppuosassa käsitellään tarkemmin linjakäytön ohjausjärjestelmää sekä toimilaitteita. Kuvauksessa viitataan lähinnä ABB Drivesin toimittamiin ja kehittämiin järjestelmiin sekä ratkaisuihin.

2.4.1 Sovellusohjain

Hajautetussa järjestelmässä linjakäytön ohjauksen ylemmän tason muodostavat automaatiojärjestelmän hajautetut sovellusohjaimet sekä väyläohjain. Sovellusohjain on esitetty kuvassa 2–7. Sama sovellusohjain soveltuu sekä vaihtosähkö- että tasa-sähkökäyttöjen ohjaukseen. Sovellusohjainkortti sijoitetaan ryhmäsäätäjän yhteyteen, jonka kanssa se kommunikoi nopean sarjaliitännän välityksellä. Sovellusohjain konfiguroidaan erillisen lohko-ohjelmoitavan ohjelmointikielen avulla. Käyttöönotto ja ylläpito tapahtuu ohjaimeen liitettävän PC:n avulla.



Kuva 2–7. Hajautetun järjestelmän sovellusohjain.

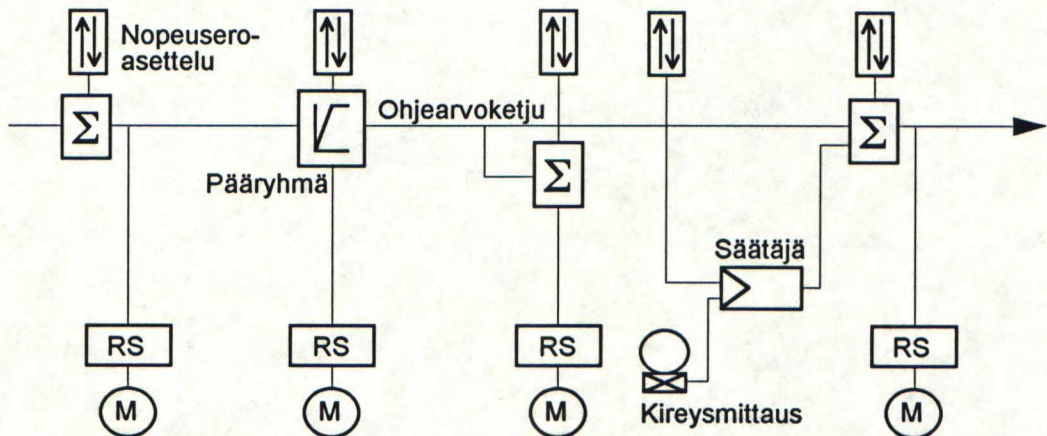
Linjakäytön sovellusohjaimen tärkeimpiä tehtäviä ovat

- nopeuden ohjearvoketjun laskenta
- ohjaus- ja lukituslogiikka
- ratakireyden säätö
- kommunikointi väylään
- kommunikointi käyttöhenkilöstön sekä muiden ohjausjärjestelmien välillä
- diagnostiikka
- hälytysten käsittely
- oloarvotietojen käsittely

Näiden lisäksi muita toimintoja ovat erilaiset raportoinnit, trendien ohjaus, ajoprofiili-muisti sekä ohjaukset erityistilanteissa. Käyttäjäliityntä toteutetaan tavanomaisesti valvomomonitorien ja operointinäppäimistön sekä konehallissa sijaitsevien ohjauspaneelien avulla.

2.5 Säätömenetelmät

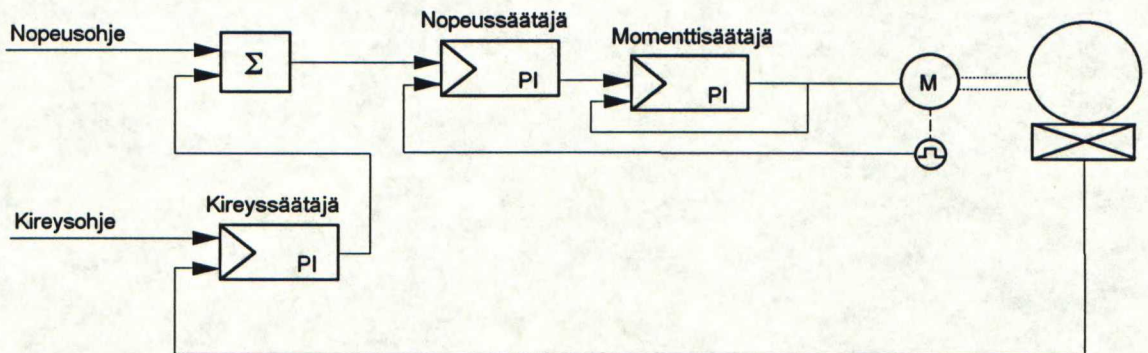
Linjakäytön ohjausjärjestelmän rungon muodostaa koko koneen läpi kulkeva kuvan 2–8 mukainen nopeuden ohjearvoketju, jonka avulla määritellään käyttöryhmien väliset riippuvuudet toisiinsa nähden. Kutakin käyttöryhmää voidaan tavallisesti ohjata itsenäisesti nopeuden suhteen, jolloin nopeuserojen avulla voidaan muodostaa paperirataan veto ja estää sen hallitsematon käyttäytyminen telaryhmien välissä. Ohjearvoketju muodostuu pääryhmästä sekä muista kireys-, nopeus- tai momentti-säädetyistä ryhmistä, jotka saavat perusnopeusohjeensa pääryhmältä. Pääryhmäksi valitaan tavallisesti jokin ryhmä, jolla on rataan hyvä pito. Yleensä muiden ryhmien nopeutta voidaan säätää suhteessa ketjussa tulevaan ohjeeseen. Nopeusero voidaan asettaa nopeussäädetyissä ryhmässä ajomiehen toimesta tai kireyssäädetyissä ryhmässä säätäjältä tulevan ohjeen mukaisesti halutun ratakireyden aikaansaamiseksi.



Kuva 2–8. Esimerkki nopeuden ohjearvoketjusta.

Ryhmät voivat olla ohjearvoketjussa joko *ketju*- tai *oksaryhminä* riippuen siitä, välittävätkö ne oman nopeuserokorjauksensa ketjussa eteenpäin. Yleensä ketjuryhmiksi valitaan vain pitäviä ryhmiä, jolloin luistosta johtuva ratanopeuden ja telan pintanopeuden välinen ero ei aiheuta virheellistä nopeuskorjausta ketjun jälkipäässä.

Koska käyttöryhmiä ajetaan eri nopeuksilla, muodostuu koneelle tietynlainen nopeusprofiili, jonka muoto ja nopeuserojen suuruus riippuu paljolti kyseisellä hetkellä ajettavasta paperilaadusta sekä ajotilanteesta. Kosteaa paperin venymää joudutaan kompensoimaan ryhmien välisillä nopeuseroilla. Yleisesti nopeuserot ovat radan kulkusuunnassa positiivisia koneen loppupäätä kohti, mutta toisaalta paperin kastuminen päällystyksessä ja kutistuminen kuivatuksessa voi johtaa hyvinkin vaihtelevaan nopeusprofiiliin. Vastaavasti koneelle muodostuu ajossa tietynlainen momentti- ja kireysprofiili. Momenttiprofiilin muoto kertoo eri ryhmien välisen kuormituksen tasaisuudesta. Koska monet ryhmät voivat yleensä toimia generaattorina ja syöttää tehoa takaisin verkkoon (ns. kaksisuuntaiset ryhmät), voi ryhmän momentti olla myös negatiivinen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että telan jälkeinen rataosa tai telan kanssa mekaanisessa sidoksessa oleva käyttöryhmä vetää telaa mukanaan. Momentti- ja kireysprofiilin tulisi aina olla selkeästi positiivinen aukirullaimen jarrugeneraattoria lukuunottamatta.

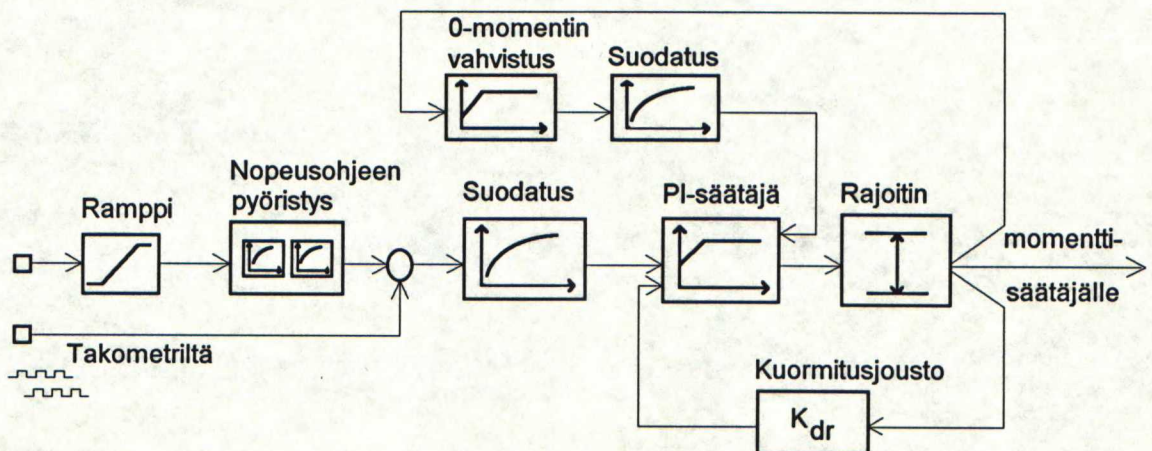


Kuva 2–9. Kaskadisäädön periaate.

Säädössä noudatetaan kuvan 2–9 mukaisesti kaskadisäätöperiaatetta, jossa sisimpänä säätöpiirinä toimii momenttiohjeensa nopeussäätäjältä saava momenttisäätäjä. Kireyssäädetyissä ryhmissä nopeussäätäjän ohjetta korjataan kireyssäätäjän antamalla korjauksella. Momenttiohjeissa auki- ja kiinnirullaimissa kireyssäätäjän ohje tuodaan suoraan momenttisäätäjälle.

2.5.1 Nopeussäätö

Suurin osa ryhmistä on joko puhtaasti nopeussäätöisiä tai ne saavat ohjeensa säätöjärjestelmässä uloimpana olevan kireyssäätäjän ohjeella korjattuna. Myös momenttisäätöiset ryhmät voivat toimia nopeussäätöisenä prosessiolosuhteiden niin vaatiessa. Nopeussäätäjän periaatekaavio on esitetty kuvassa 2-10. Nopeussäätöistä käyttöryhmää säädetään prosessinohjaustasolta saadun ohjearvon ja pulssianturilla mitatun pyörimisnopeuden oloarvon perusteella käyttöryhmän ryhmäsäätäjässä. Säätäjänä käytetään digitaalista PI-säätäjää, johon on voitu liittää sovelluskohtaisia erityistoimintoja.

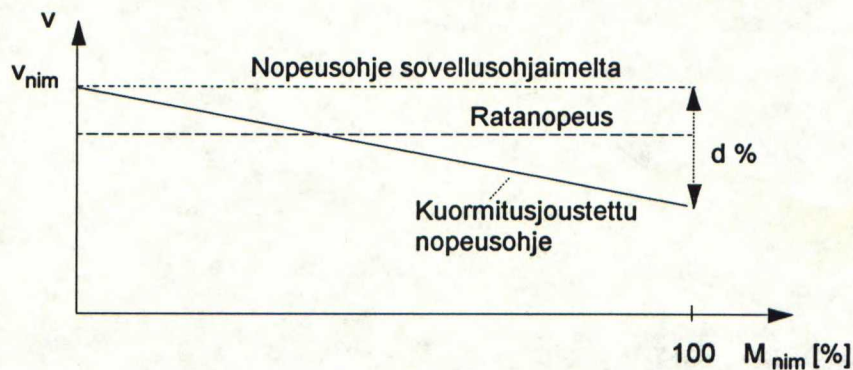


Kuva 2-10. Nopeussäädön periaate. /6/.

Nopeussäätäjän dynamiikkaan vaikuttavat olennaisesti digitaalinen PI-algoritmi, ohjearvon suodatus sekä nollamomentin läheisyydessä esiintyvät ongelmatilanteet. Derivoivaa säätöä on hankala toteuttaa nopeusmittauksessa esiintyvän rippelin vuoksi. Säätöalgoritmina käytetään ns. anti-windup algoritmia, jolla estetään integraaliosan liiallinen kertyminen. Säätäjälle menevää erosuuretta suodatetaan akselin jouston ja välyksen aiheuttaman värähtelyn vaimentamiseksi. Tasavirtakäyttöillä momentin suunnanvaihtoja joudutaan rauhoittamaan niiden vaatiman sillanvaihdon vuoksi, oikosulkumoottoreilla ongelmat liittyvät säätöön nollamomentin lähellä. Molemmilla käytöillä nopeussäädön vahvistusta yleensä pienennetään momentin pienentyessä edellä mainittujen ongelmien sekä mekaanisessa järjestelmässä olevien välysten vuoksi. Nopeussäätöpiirin säätöväli vaihtelee tyristorisuuntaajien 30 millisekunnista uusimpien taajuusmuuttajasukupolvien muutamaan millisekuntiin. Käytännön kokemuksesta tiedetään, että yli 40 millisekunnin suuruinen säätöväli ei ole riittävä nykyisten paperikonekäyttöjen ohjaukseen. Tällöin nopeussäädön kaistanleveys on

liian alhainen korjaamaan systeemissä mahdollisesti esiintyviä mekaanisia värähtelyjä. Alle 5 millisekunnin aikatasolla on mahdollista vaikuttaa myös akselin vääntövärähtelyyn. /7/.

Kuormitusjoustoa käytetään, kun kahden yleensä mekaanisesti toisiinsa sidoksissa olevan käyttöryhmän tulee tarkasti seurata toistensa nopeutta, mutta yhteys ei ole kiinteä esimerkiksi luiston takia. Tällöin yhteyden syntyessä pienikin ero nopeudessa aiheuttaisi toisen ryhmän toimimisen generaattorina toisen ryhmän pyörittämänä. Kuormitusjoustossa joustettavalle ryhmälle annetaan hieman ratanopeutta suurempi nopeusohje, jolloin momenttiohjeesta takaisinkytketty jousto pienentää nopeusohjetta siten, että nopeussäätäjän lähtö hakeutuu tasapainotilaan kuvan 2-11 mukaisesti. Tasapainopisteessä ryhmän nopeus vastaa todellista ratanopeutta. Kuormitusjouston määrä ilmaistaan prosentteina maksiminopeudesta nimelliskuormalla.

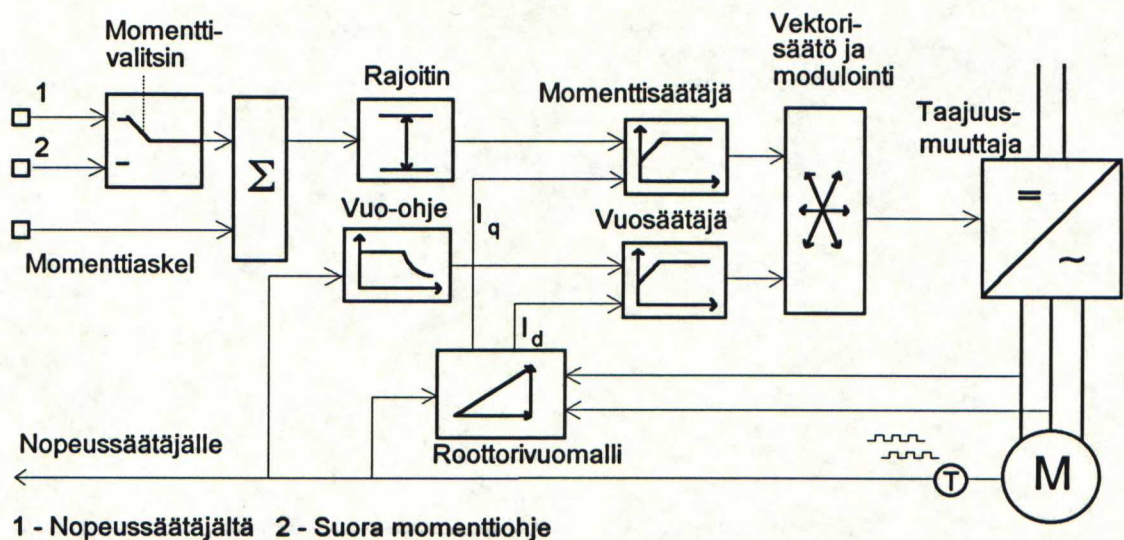


Kuva 2-11. Kuormitusjouston periaate.

Nopeuden mittaukseen käytetään tavallisesti inkrementaalisia pulssiantureita. Yleisimmin käytettävät anturit lähettävät 1024 tai 2048 pulssia kierrosta kohti, jälkimmäisellä saadaan riittävästi pulsseja myös alhaisilla kierrosnopeuksilla. Kahden 90 asteen vaihesiirrolla lähetetyn pulssijonon avulla saadaan selville myös pyörimissuunta. Pulssiantureiden aikaviiveet ovat hyvin pieniä, nopeusmittaukseen liittyvät tarkkuusongelmat ilmenevät lähinnä alhaisilla nopeuksilla, jolloin pulssien muotovääritymät aiheuttavat epätarkkuutta sekä pulsseja saadaan aikayksikköä kohti harvemmin. Pinnanopeuden absoluuttiseen tarkkuuteen vaikuttavat olennaisesti myös valmistajan ilmoittamien telahalkaisijoiden ja vaihteistovälitysten tarkkuus. /8/.

2.5.2 Momenttisäätö

Momenttisäädössä säädetään moottorille annettavaa virtaa. Tasavirtakäytöissä moottorimomentti on suoraan verrannollinen ankkurivirtaan, vaihtovirtakäytöissä oikosulkumoottorin momentti on virran ja roottorivuon vektoritulo eli moottoria ohjataan vektorisäädöllä. Vektorisäädön periaate on esitetty kuvassa 2-12. Suoraa momenttisäätöä käytetään lähinnä keskiökäyttöisissä auki- ja kiinnirullaimissa, joissa rullattavan paperirullan halkaisijan muuttuessa täytyy moottorin vääntömomenttia muuttaa vakiokireyden ylläpitämiseksi.



Kuva 2-12. Oikosulkumoottorin vektorisäädön periaate.

Kun kaksi tai useampi ryhmää on kytketty toisiinsa mekaanisesti yhteen esimerkiksi huovan tai nipin välityksellä, käytetään kuormituksen jakoa. Siinä jokaisella ryhmällä on oma momenttisääätäjänsä, mutta yksi ryhmistä toimii isäntänä antaen nopeusohjeen muille ryhmille. Kuormitusjako isäntä- ja orjaryhmien välillä asetetaan yleensä niiden tehojen määräämässä suhteessa. Kuormitusjaolla varmistetaan, että kaikki ryhmät ottavat osansa kuormasta eikä mikään ryhmistä toimi generaattorina muiden vetämänä radan tai huovan välityksellä.

Momenttikompensoinneilla rauhoitetaan ennalta tiedettyjen kuormitustilanteiden aiheuttamaa muutosta antamalla suora momenttiaskel nopeussäätäjän ohi. Tällöin nopeussäätäjän tehtäväksi jää huolehtia nopeuden hienosäädöstä, ideaalitapauksessa

säätäjä korjaisi vain kitkoista ja ratavoimasta aiheutuvan kuormituksen. Momentti-kompensointeja käytetään yleisimmin ryhmän hitausmassan kompensointiin kiihdytys- ja hidastustilanteissa sekä päällystysterien ja puhdistuskaavareiden aiheuttaman kuormituslisän kompensointiin.

2.5.3 Kireyssäätö

Paperiradan pitkittäissuuntaista kireyttä voidaan hallita kahden pitävän ryhmän välillä; luistava ryhmä ei pysty välittämään rataa tarvittavaa momenttia. Ratakireys syntyy ryhmien välisestä nopeuserosta, jota voidaan säätää joko ajomiehen toimesta tai käyttämällä kireyssäätäjää.

Ratakireyttä tarvitaan, jotta paperirata kulkisi halutulla tavalla koneen läpi. Sopivan ratakireyden avulla estetään paperin poikkisuuntainen vaeltaminen sekä paperin rypistyminen, joka heikentää lopputuotteen laatua ja pahimmillaan johtaa ratakatkoon. Tasainen ja riittävä kireys on erityisen tärkeää kiinnirullausasemalla, jotta rulla ei purkaudu sivulle teleskoopin tavoin ja jotta rullaa purettaessa seuraavalla jälkikäsitteilykoneella ei tapahtuisi suuria kireysvaihteluja.

Kireyssäädön tehtävänä on tasata ulkoisten häiriötekijöiden aiheuttamia kireysvaihteluja, joihin voi olla useita syitä. Häiriöt voivat syntyä esimerkiksi nippien sulkeutumisesta ja kaavareiden tai päällystysasemien kiinnimenosta. Kiihdytys- ja hidastustilanteissa koneen ryhmien erisuuret hitausmassat käyttäytyvät eri tavalla: suuret hitausmassat eivät kykene seuraamaan kiihdytyksen nopeusohjeramppia yhtä tarkasti kuin massaltaan pienemmät ryhmät. Kireyssäätö mahdollistaa joustavamman lajinvaihdon, koska se ottaa huomioon radan leveyden, neliömassan, paperin paksuuden ja kimmo-ominaisuuksien muutoksen pitäen yllä annetun kireysohjeen. /9/.

Vaikka kireyssäädön tehtävä on korjata kireydessä esiintyvät häiriöt mahdollisimman nopeasti, joudutaan reaali maailman olosuhteiden vuoksi säätöä pehmentämään. Äkinäiset ohjaukset voivat johtaa ratakatkoihin ja kalliisiin tuotannonmenetyksiin. Liian tiukaksi viritetty säätö voi aiheuttaa säätöpiirin resonointia prosessiolosuhteiden muuttuessa. Kireyssäädön tärkeimpiä ominaisuuksia onkin robusti toiminta.

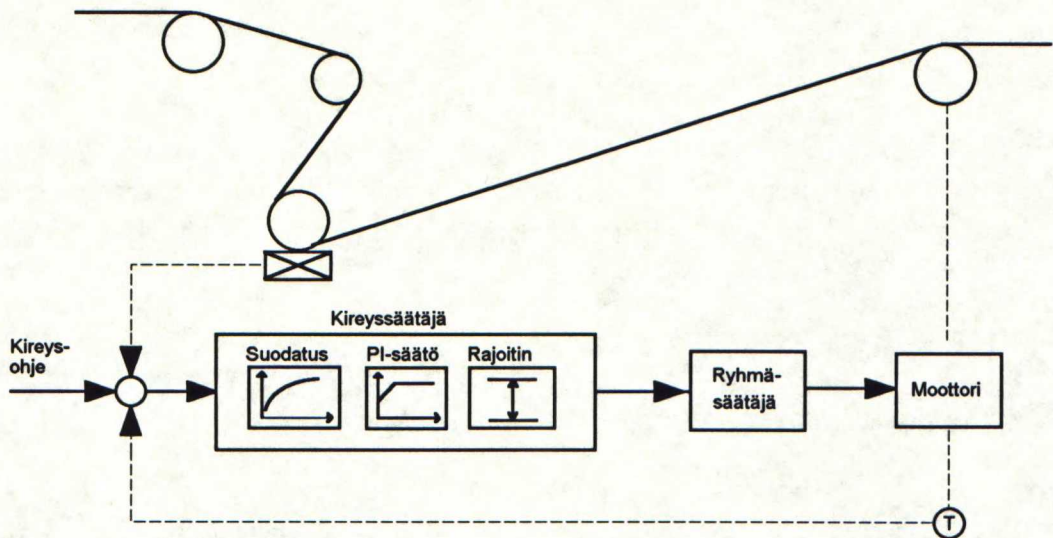
Kireyssäätö toteutetaan yleisimmin jollakin seuraavista tavoista:

- moottorin momenttisäädöllä
- voima-anturin ja säätäjän avulla
- heiluritelan ja säätäjän avulla

Momenttisäätö on yksinkertaisin tapa säätää ratakireyttä, toisinaan se voi olla ainoa vaihtoehto kun esimerkiksi prosessiolosuhteet eivät salli kireysmittaustelan kosketusta rataan. Momenttisäädössä ryhmää ajetaan käyttäjän asettamalla vakiomomentilla. Tällöin oletetaan, että moottorin akselille tulevat momentin muutokset aiheutuvat yksinomaan ratakireyden muutoksista. Momenttisäätö ei pysty erottelemaan kireyden aiheuttamia muutoksia muista kuormitushäiriöistä. Tämä asettaakin tarkemmat vaatimukset inertian kompensoinnille. Sykliset momenttihäiriöt aiheuttavat värähtelyä myös ratakireydessä, koska tällöin osa käytön vakiomomentista kuluu häiriön aiheuttamaan kuormitukseen. Lisäksi kitkan aiheuttama kuormitusmomentti muuttuu ainakin pyörimisnopeuden ja ajan funktiona, samoin kuivatus- ja jäähdytyssylintereiden vesikuorman aiheuttama kuormitus. Mikäli kuitenkin ratakuormituksen osuus moottorin kuormasta on suhteessa muuta kuormitusta suurempi, on momenttisäätö tehokas ja edullinen säätötapa. /9/.

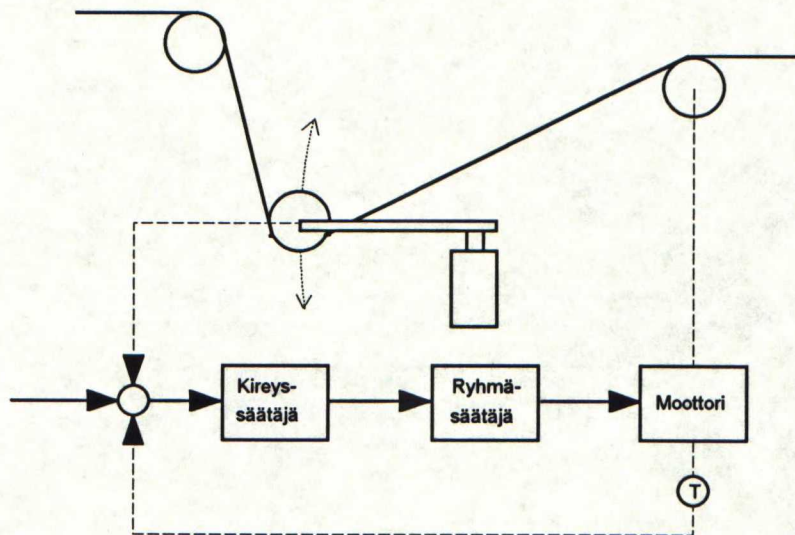
Toisinaan myös kuormitusjoustoa käytetään itsenäisissä ryhmissä tasaamaan kireysvaihteluja, tällöin voi kuitenkin seurata tiettyjä ongelmatilanteita. Kiihdytyksen kompensoinnin tulee olla tarkka, jotta nopeussäätäjän ei tarvitsisi osallistua kiihdytykseen. Koneen käyttäjän tulee myös tuntea kuormitusjoustosäätö: koska kuormitusjousto toteutetaan ryhmäsäätäjässä, näkyy valvomossa nopeuden olo- ja ohjearvossa ero, jonka käyttäjä voi tulkita säätöpoikkeamaksi.

Tavallisimmin kireyssäätö toteutetaan voima-anturin ja kireyssäätäjän avulla. Säätäjä voi olla joko erillinen itsenäinen yksikkö tai toteutettu ohjelmallisesti prosessin ohjaustasolla. Kuvassa 2-13 on esitetty digitaaliseen PI-algoritmiin perustuvan kireyssäädön periaatekaavio. Säädön onnistumiseen vaikuttavat olennaisesti voimaantureilta saadun mittauksen luotettavuus sekä säätäjien sopiva viritys. Kireyden mittausta voima-antureilla ja siihen liittyviä häiriötekijöitä on käsitelty tarkemmin kapaleessa 2.6.



Kuva 2-13. Voima-anturin ja säätäjän avulla toteutetun kireyssäädön periaate.

Kuvan 2-14 mukaisessa heiluritelasäädössä säädetään heiluritelan paikkaa siten, että telalla on mahdollisimman suuri säätöreservi. Systeemi toimii siten eräänlaisena materiaaivarastona. Ratakireys saadaan mittaamalla telan poikkeamaa tasapainoasemastaan. Nykyiset heiluritelat on yleensä varustettu paineilmasylintereillä kitkavoimien minimoimiseksi. Heiluriteloja käytetään yleensä auki- ja kiinnirullaimien yhteydessä tasoittamaan rullanvaihdon yhteydessä syntyviä kireystransientteja. Heiluritelasäätö ei ole kovin yleinen Suomessa.



Kuva 2-14. Heiluritelasäädön periaate.

2.5.4 Rullaimien ohjaukset

Aukirullausasemaa päällystys- ja jälkikäsitteilykoneilla ohjataan kireyssäätöisesti siten, että jarrugeneraattori syöttää tarvittavan jarrutusmomentin lähtörullaan. Ryhmä toimii nopeussäätöisesti ainoastaan päänniennin ja lentävän liimauksen aikana. Jarrugeneraattorin momenttiohje muodostuu neljästä tekijästä: lähtörullan hitausmomentin kompensoinnista, ratakireyden ohjearvosta, rataan ja moottorille vaikuttavien kitkojen kompensoinnista sekä kireyssäätäjän korjauksesta /10/

$$M_{\text{tot}} = \frac{J_{\text{tot}} d\omega}{dt} + F^* r' + F_{\mu r} r' + F_{\mu m} + F_c r' \quad (2.3)$$

missä

J_{tot} = $J_m + J_r i^2$, moottorin ja telan hitausmassat redusoituna moottorin puolelle [kgm²]

ω = moottorin pyörimisnopeus [rad/s]

F^* = ratakireyden ohjearvo [N]

$F_{\mu r}$ = rataan vaikuttava kitkavoima [N]

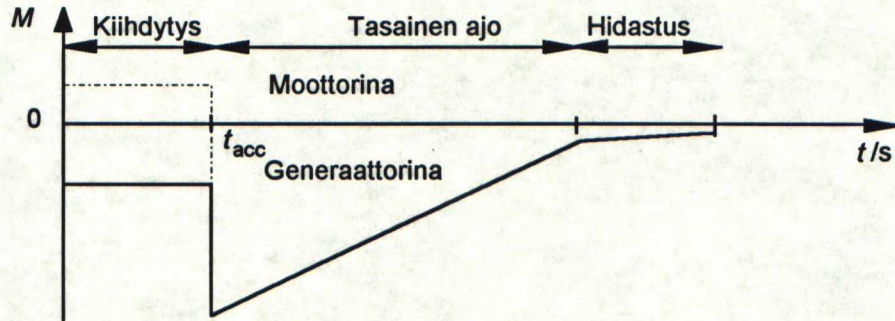
$F_{\mu m}$ = moottorille vaikuttava kitkavoima [N]

F_c = kireyssäätäjän korjaus [N]

r' = moottorille redusoitu rullan säde r / i [m]

i = vaihteiston välityssuhde

Leikkurin aukirullaimen tyypillinen toimintasekvenssi on esitetty kuvassa 2–15. Kiihdytysvaiheessa käyttö voi toimia moottoripuolella, mutta tasaisella ajolla rata päällä aina generaattorina. Koska kiihdytyksen kompensointi lasketaan derivaattana annetusta nopeusohjeesta, täytyy nopeusohjetta pyöristää siirryttäessä tasaisesta ajosta hidastukseen tai kiihdytykseen ja päinvastoin. Liian terävät nopeusohjeen muutokset aiheuttaisivat derivaattaan piikin ja tästä aiheutuvat momenttiohjeen muutokset rasittaisivat mekaniikkaa. Päällystyskoneissa, joissa käytetään lentävää liimausta, yleensä ainoastaan kireysohjetta pudotetaan rullanvaihdon aikana siten että liimaussauva saadaan ajettua koneen läpi.



Kuva 2–15. Leikkurin aukirullaimen ajosekvenssi.

Tasavirtakäyttöillä päästään edullisempaan mitoitukseen, kun myös koneen magnetointivirtaa säädetään rullan halkaisijan funktiona. Lisäksi säätötarkkuus paranee ankkurivirran osuuden ollessa riittävän suuri myös pienellä rullan halkaisijalla.

Kiinnirullausasema voi olla keskiökäyttöinen tai yleisemmin rullainsylinterin avulla toteutettu. Keskiökiinnirullainta ohjataan samalla tavalla kuin aukirullainta, mutta se voi olla myös nopeussäätöinen. Rullainsylinterin käyttö voi olla nopeus- tai momenttisäätöinen. Uloimpana säätönä kiinnirullaimissa käytetään kuitenkin aina kireyssäätöä.

2.6 Kireyden mittaus voima-anturilla

Yleisimmin käytetty menetelmä ratakireyden määrittämiseen on suora mittaus voima-antureiden avulla. Anturit sijoitetaan tavallisesti johonkin koneessa olevaan johtotelaan, kriittisissä kohteissa kuten nopeissa leikkureissa voidaan käyttää erityisiä kireysmittausteloja, jolloin virhetekijöiden vaikutusta saadaan vähennettyä. Anturit sijoitetaan yleensä telan molempiin päihin, toisinaan voidaan käyttää yksittäistä anturia. Leveillä koneilla voidaan käyttää myös joskus kolmea tai useampaa anturia, jolloin saadaan tietoa myös radan kireysprofiilista. /11/.

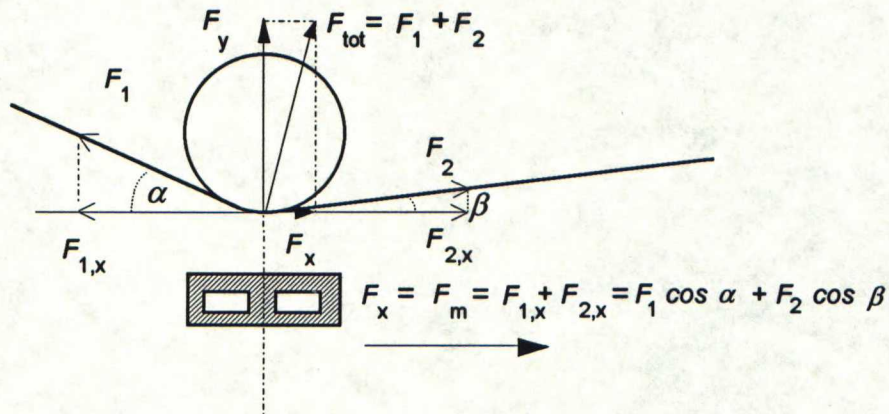
Kireysanturi välittää kireyden oloarvon säätävälle yksikölle. Anturit voivat toimia usealla eri periaatteella, esimerkiksi ABB:n Pressductor kireysanturi perustuu mekaanisen paineen aiheuttamaan muutokseen materiaalin permeabiliteetissä. Anturin ohjausyksikkö lähettää kireysoloarvon säätäjyksikölle amplitudimoduloituna jänniteviestinä, jolloin sähköisesti kytkeytyvät muun taajuiset häiriöt eivät mittauksessa näy. /12/. Yleensä mittausta joudutaan suodattamaan ryhmän mekaanisten häiriöiden vuoksi, mikä huonontaa säädön dynamiikkaa mittauksen viivästyessä. Pääosin mit-

taussignaali pyritään suodattamaan anturin säätöyksikössä, mutta myös prosessi-
asemassa signaalia suodatetaan ennen varsinaista kireyssäätäjää. Tämän suotimen
tehtävä on lähinnä poistaa mittaussignaaliin anturin jälkeen sähköisesti kytkeytyneet
häiriöt.

Mittauksen ja siten koko kireydensäädön onnistuminen riippuu useasta tekijästä.
Tärkeimpiä näistä ovat

- kohteeseen sopivan anturin valinta
- anturin sijoittaminen
- anturin kalibrointi
- ulkoiset mittaus- ja momenttihäiriöt

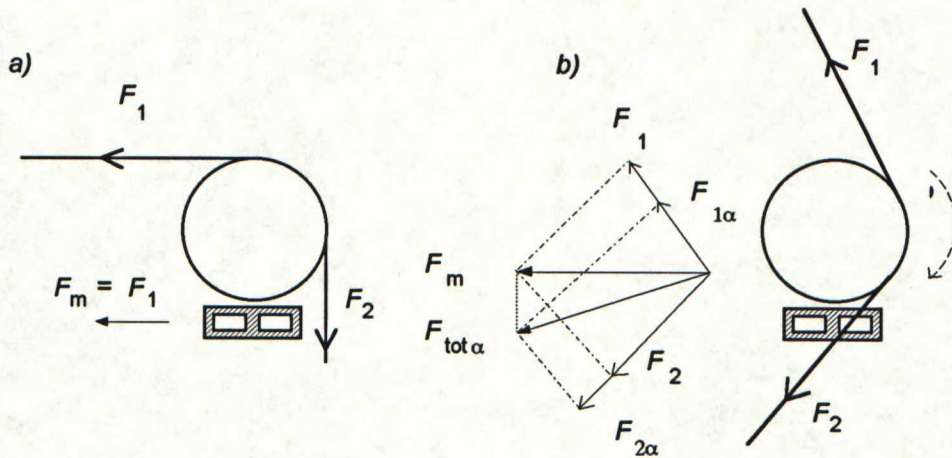
Kalibroinnissa tulisi varmistaa että telalle aiheutettu kuormitus on radanviennin mu-
kainen ja telat pääsevät pyörimään vapaasti. Kalibroinnin epätarkkuus aiheuttaa vir-
heen mittauksen absoluuttisessa tarkkuudessa.



Kuva 2-16. Kireysmittauksen voimavektorit.

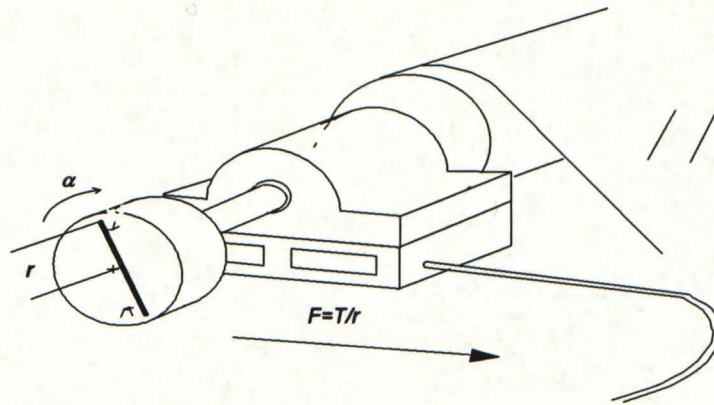
Anturit ovat yleensä herkkiä vain tietyssä mittaussuunnassa tapahtuville voimamuutoksille. Anturiin kohdistuva radan voimavektori voidaan siten jakaa hyötykomponenttiin sekä tähän nähden kohtisuoraan komponenttiin. Mikäli hyötykomponentti on suhteessa pieni hyödyttömään komponenttiin nähden kuten kuvan 2-16 tapauksessa, vaatii mittaus suuremman vahvistuksen. Vastaavanlainen ongelmatilanne syntyy, kun anturit sijoitetaan pystysuoraan siten, että anturit mittaavat myös telan painoa. Tällöin ratavoima näkyy mittauksessa suhteellisen pienenä muutoksena telan massan aiheuttamaan voimaan nähden. Tässäkin tapauksessa vahvistusta joudutaan lisäämään jolloin kohinan suhteellinen osuus mittauksessa kasvaa. /11/.

Kireysmittaustelojen sijoittelu tapahtuu usein konetoimittajan toimesta. Tela voi olla joko varustettu käytöllä tai vapaasti pyörivä. Mikäli telassa on oma käyttö, aiheuttaa käytön momentti kuvan 2-17 tilanteissa (toinen voimista pidetään vakiona ulkoisella kompensoinnilla) kireyseron telan molemmille puolille. Parhaimmillaan tällainen tela olisi sijoitettu kuvan 2-17 b) mukaisesti, jolloin anturi mittaa voimien F_1 ja F_2 keskiarvoa eikä käytön momentti näy mittauksessa. Kuvan 2-17 a) tapauksessa anturi ilmaisee ainoastaan ratavoimaa F_1 . Vastaavasti kiihdytystilanteessa käytöttömän telan hitausmassa vaatii osan radan voimasta aiheuttaen kireyseron telan eri puolille. Tässäkin tapauksessa paras tulos saavutetaan, mikäli anturi voidaan sijoittaa b)-kohdan mukaisesti, jolloin mittaus ilmaisee voimien $F_{1\alpha}$ ja $F_{2\alpha}$ keskiarvoa. Hyvällä yhteistyöllä konetoimittajan kanssa jo rakennesuunnitteluvaiheessa vältetään monilta edellä mainituista ongelmista.



Kuva 2-17 a) ja b). Anturin asennuskulman merkitys ratavoiman mittauksessa.

Mikäli kireysmittaustela on varustettu omalla käytöllä, tulee akselin ja telan kytkimen olla erityisen huolellisesti suunnattu. Huonosti suunnattu kytkin aiheuttaa kiihdytys- ja hidastustilanteissa telaan toispuolisen vääntömomentin, jonka kireysanturi havaitsee kytkinrakenteesta riippuen kuvan 2-18 mukaisesti tasakomponenttina tai pyörimistäajuisena vaihtokomponenttina. Huolellisella suuntauksella ja hyvällä kytkinrakenteella ongelmalta vältetään. /11/.



Kuva 2-18. Huonosti suunnatun kytkimen vaikutus kireysmittaukseen.

Kireysmittauksen muita tyypillisiä kohinalähteitä voivat olla mittaustelan ja kannatusten mekaaninen värähtely, telan epäkeskeisyys sekä telan ja paperin väliin puristuvan ilman epämääräinen käyttäytyminen. /13/.

Edellämainitut parannukset voidaan toteuttaa koko koneen osalta vain ihannetapauksessa, käytännössä on pyrittävä tekemään olosuhteet mittauksen onnistumiselle parhaaksi mahdolliseksi. Tärkeää on kuitenkin tuntea mittaustarkkuuteen vaikuttavat tekijät sekä mahdolliset virhelähteet koko kireyssäätöpiirin toiminnan ymmärtämiseksi.

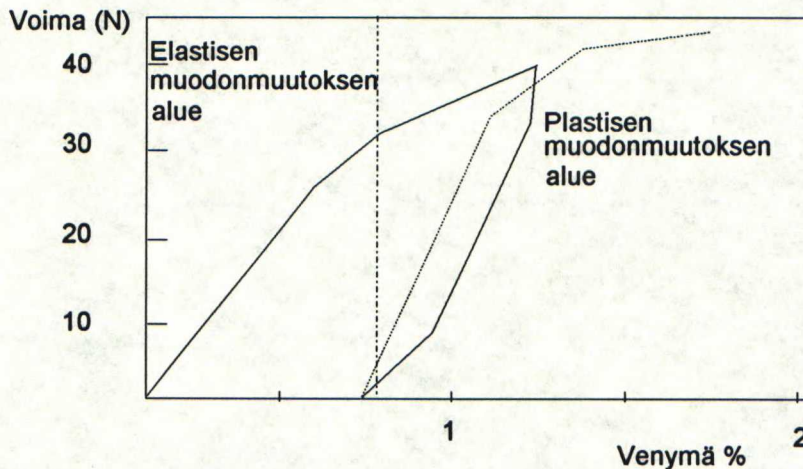
3. KIREYSSÄÄDETTY PAPERIKONEKÄYTTÖ

3.1 Paperiradan ominaisuudet

Paperi on rakenteeltaan paperikuitujen muodostama verkosto, jonka ominaisuudet riippuvat kuitujen ominaisuuksista, niitä yhdistävistä sidoksista sekä kuitutiheyden jakautumisesta arkissa. Kuitujen ominaisuudet muuttuvat paperin valmistuksen eri vaiheissa huomattavasti, näistä merkittävämpiä tekijöitä ovat vesipitoisuuden muutokset ja kuitujen litistyminen. Paperikoneella valmistetulle paperille on tyypillistä kuituorientaatio – konesuuntaisia kuituja on poikkisuuntaisia enemmän. Kuituorientaatiota lisäämällä samoin kuin konesuuntaista venytystä kasvattamalla voidaan parantaa paperin lujuutta, kasvattaa kimmomoduulia ja siten jäykkyyttä sekä pienentää venymää. /14/.

Kuivuessaan paperi pyrkii aina kutistumaan – kuituorientaation vuoksi yleensä enemmän poikki- kuin konesuunnassa. Paperin kutistumistaipumukseen vaikuttavat erityisesti massan ominaisuudet, jauhatus sekä lisäaineet. Kutistumisen estäminen on tärkeää paperin mittapysyvyyden kannalta ja se pyritään estämään konesuunnassa sylinteriryhmien välisillä nopeuseroilla, jolloin paperirataan aiheutetun muodonmuutoksen määrää kutsutaan jähmettyneeksi venymäksi. Kuivumisen aikana paperiin kiinnittynyttä sisäistä jännitystilaa sanotaan puolestaan jähmettyneeksi jännitykseksi. Tämän ulkoisen kutistumista estävän voiman voidaan ajatella varastoituvan potentiaalienergiana paperiin ja kasvattavan siten murtolujuutta sekä paperin kimmomoduulia.

Paperin on todettu käyttäytyvän vetokuormituksen alaisena kuten viskoelastinen aine. Voima-venymäkäyrät ovat epälineaarisia ja riippuvat mm. kuormitusolosuhteista, kuormitusnopeudesta sekä ulkoisista olosuhteista, etenkin kosteudesta. Kuormituskokeissa paperin voima-venymäkäyrän on todettu noudattavan kuvan 3-1 mukaista muotoa. Venymä on aluksi lähes täysin kimmoista, jolloin paperi ulkoisen jännityksen poistuessa palautuu alkuperäiseen mittaansa eli muodonmuutos on elastista. Venyttävän voiman ylittäessä tietyn rajan käyttäytyy paperi plastisesti; muodonmuutokset palautuvat kaksivaiheisesti, lisäksi uudelleen kuormitettaessa (merkitty kuvaan 3-1 katkoviivalla) todetaan hystereesi-ilmiö. Murtopistettä edeltävän kuormituskäyrän muoto riippuu oleellisesti paperin valmistuksessa vallinneista olosuhteista. /15/.



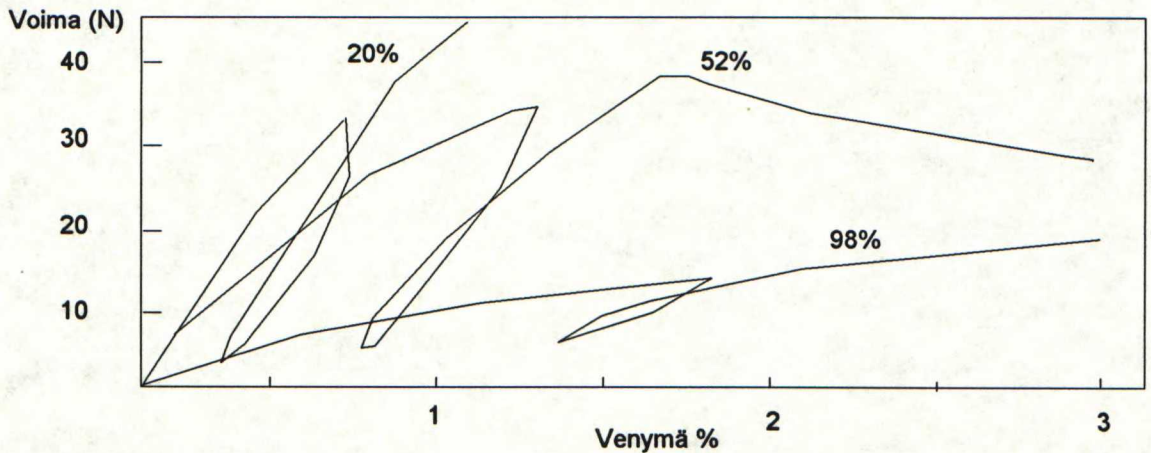
Kuva 3-1. Useassa jaksossa saatu paperin voima–venymäkäyrä.

Venymän ollessa pieni ja tapahtuessa lyhyellä aikavälillä, voidaan voima–venymäkäyrä olettaa edellä todetun perusteella lineaariseksi ja paperi täysin kimmoiseksi materiaaliksi. Viskoottisen termin osuus esimerkiksi sanomalehtipaperilla on vain muutamia prosentteja elastisen termin suuruudesta. /16/.

3.1.1 Paperiradan kimmo–ominaisuudet

Paperiradan kimmokertoimella tarkoitetaan siis voima–venymäkäyrän kulmakerrointa origon lähellä. Kimmokerroin kasvaa eksponentiaalisesti kuiva–ainepitoisuuden funktiona. Toisaalta venytyskohdan kuiva–ainepitoisuudella on merkitys kimmokertoimeen – kuivana venytetyn paperin kimmokerroin ei ole niin suuri kuin kosteana (alle 50 % kuiva–ainepitoisuus) venytetyn paperin. /17/. Kuten edellä todettiin, on kosteudella huomattava merkitys paperin kimmokertoimeen. Kuvassa 3-2 on esitetty suhteellisen kosteuden muutoksen vaikutus paperin voima–venymä–käyriin /18/.

Vahvan, märkänä puristetun paperin kimmokertoimen on todettu riippuvan lähes yksinomaan paperin tiheydestä sekä kutistumista estävän vedon suuruudesta. Paperiradan tiheys kuvaa radassa olevien kuitusidosten määrää ja siten kimmo–ominaisuuksia. Esimerkiksi kuivan paperin kalanterointi kasvattaa paperin tiheyttä muuttamatta kuitenkin kimmokerrointa. /19/.



Kuva 3–2. Voima–venymä–käyrien käyttäytyminen paperin kosteuden funktiona. /18/.

Muita vaikuttavia tekijöitä ovat paperikuitujen ominaisuudet ja pitoisuudet. Paperiradassa voi esiintyä myös jaksollista kimmokertoimen vaihtelua, jonka syyt yleensä löytyvät paperikoneen perälaatikon tai puristinosan säädöistä.

3.2 Elastisen materiaalin käyttäytyminen

Elastiseen materiaaliin kohdistetun voiman ja aiheutetun venymän välinen yhteys voidaan määrittää Hooken lain avulla. Paperirataan Hooken lakia voidaan soveltaa tietyin edellytyksin. Radan oletetaan olevan täysin elastinen sekä venymän pieni. Radan paksuus suhteessa telan säteeseen on pieni, samoin massa. Lämpötilan ja kosteuden oletetaan pysyvän muuttumattomana tarkastelun ajan. Tällöin Hooken lakia voidaan soveltaa sen yksikertaisimmassa muodossa

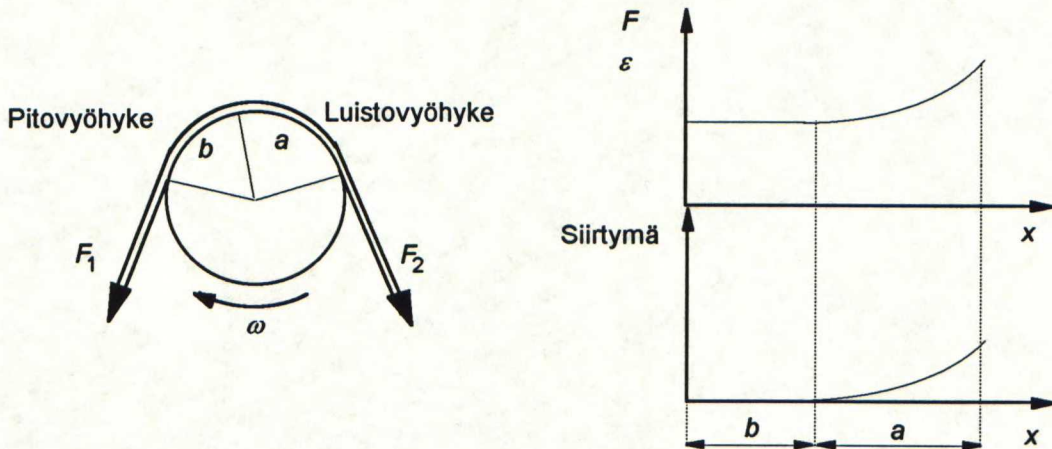
$$\sigma = \varepsilon E \quad (3.1)$$

missä σ on jännitys poikkileikkausyksikköä kohti, ε radan venymä ja E radan kimmokerroin.

3.2.1 Radan ja telan vuorovaikutus

Tarkastellaan radan ja telan muodostamaa systeemiä. Radan ja telan väliselle kontaktipinnalle muodostuu kuvan 3–3 mukaisesti pitävä ja luistava vyöhyke, joista pitovyöhyke tulee aina radan kulkusuunnassa ensin. Pitovyöhykkeellä ratanopeus ja

telan pintaanopeus ovat samat, jolloin radan tangentialiset voimat ja siten myös venymä pysyvät vakioina. Ero tangentialisten voimien välillä radan eri pisteissä aiheuttaa venymää radassa, mikä merkitsee myös liikettä radan ja telan välillä. Venymä aiheutuu siis kontaktipinnan luistavalla vyöhykkeellä, joka siten on välttämätön jotta voimaa telan ja radan välillä voisi siirtyä. /20/.



Kuva 3-3. Radan ja telan pito- ja luistovyöhyke voiman F_2 muuttuessa

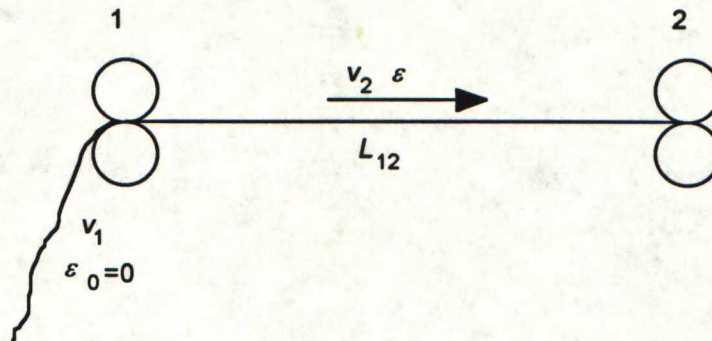
Telan ollessa lepotilassa ($\omega=0$) voimaa F_2 kasvatettaessa tapahtuu luistovyöhykkeellä radan siirtymä telan pintaan nähden. Voimaa lisättäessä pitovyöhykkeen pituus b pienenee luistavan vyöhykkeen a kasvaessa. Tangentialisten voimien välisen eron tasapainottaa luistavan vyöhykkeen ja radan välinen kitkavoima.

3.3 Kireyden muodostuminen kahden telan välillä

Kuvan 3-4 kaltaisen kahden pitävän telaparin muodostamassa systeemissä telojen pyöriessä vakionopeudella vapaan rataosuuden nopeus v_2 ja venymä ε ovat ratavälin L_{12} jokaisessa pisteessä vakiosuuruisia. Kuten edellä todettiin, venymän ja ratavoiman yhteys voidaan määritellä Hooken lain avulla

$$F = EA_0\varepsilon \quad (3.2)$$

missä ε on siis materiaalin suhteellinen venymä ja E kimmomoduuli ja A_0 poikkipinta-ala.



Kuva 3–4. Telaparin muodostama systeemi.

Systeemin materiaalitasapainon vakiotilassa määrittää yhtälö

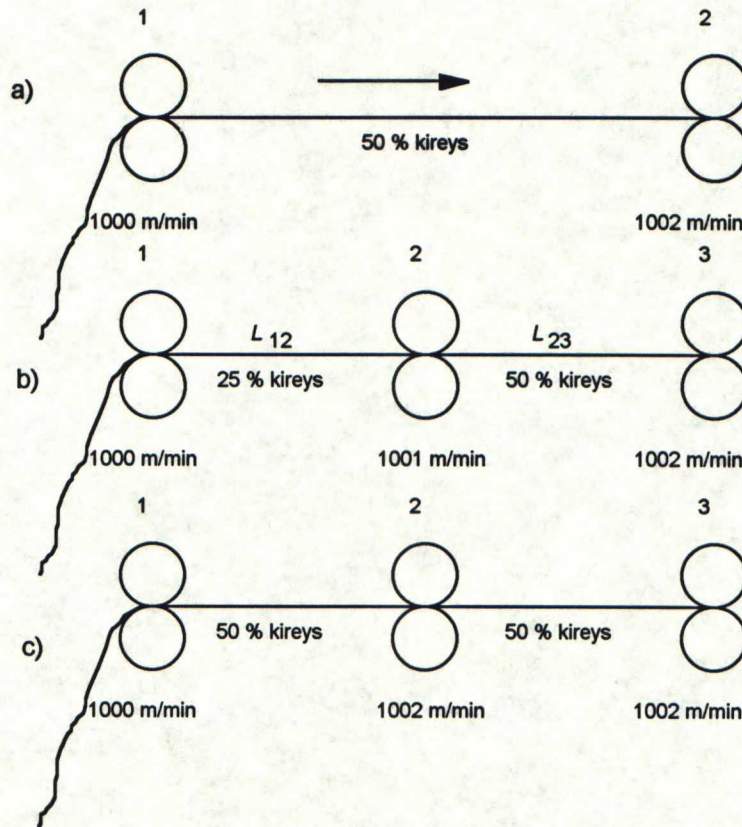
$$v_2 = (1 + \epsilon)v_1 \quad (3.3)$$

missä v_1 ja v_2 ovat ratanopeudet ennen ja jälkeen telan 1. Sijoittamalla yhtälö 3.2 yhtälöön 3.3 saadaan ratavoiman ja nopeuserojen väliseksi yhteydeksi vakiotilassa

$$F = EA_0 \frac{v_2 - v_1}{v_1} \quad (3.4)$$

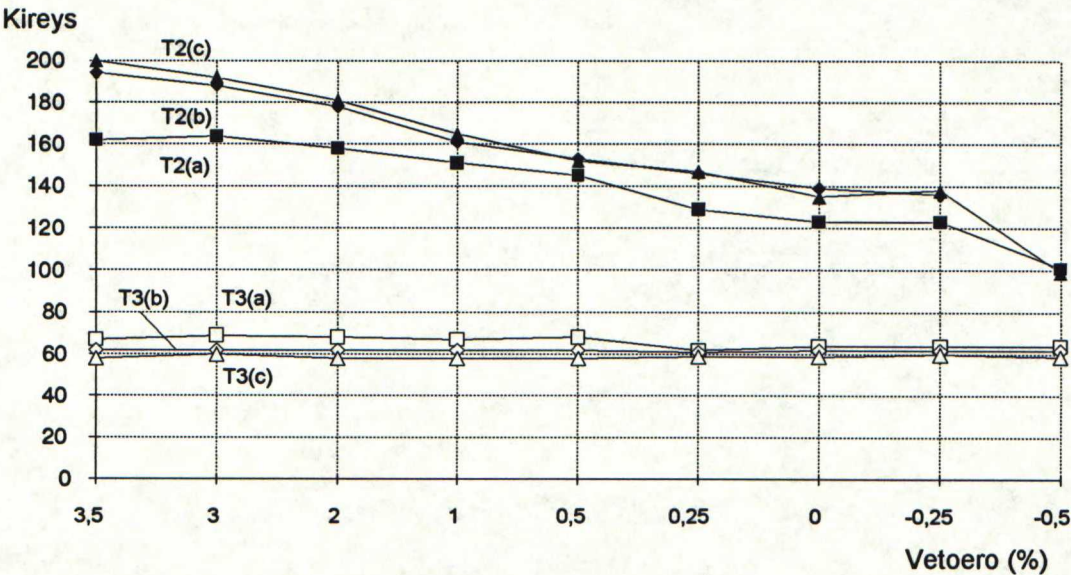
Mikäli telojen ja radan välillä on pitovyöhyke, ovat v_2 ja v_1 telojen pintanopeudet.

Kireyden muodostumista useamman telaparin välillä systeemissä, jossa 2 ‰ nopeuserolla saadaan 50 % nimelliskireys, on havainnollistettu kuvassa 3–5. Kohdassa b) telojen 1 ja 2 välillä syntyvä ratakiireys siis siirtyy seuraavalle telavälille, jossa telojen 2 ja 3 välinen nopeusero aiheuttaa puolestaan tulokireyteen summautuvan kireyслиsän. Kohdassa c) telojen 2 ja 3 välillä ei ole nopeuseroa, jolloin kireys ratavälillä määräytyy edelliseltä rataväliltä saapuvan radan tulokireydestä. /21/.



Kuva 3–5. Kireyden muodostuminen useamman telaparin välissä.

Kuvassa 3–6 on eräällä painokoneella mitatun vakiotilan kireys vetoeron funktiona eri nopeuksilla. Vetoeroa on muutettu kuvan 3–5 b) mukaisessa systeemissä telojen 1 ja 2 välillä telan 2 pyörimisnopeutta muuttamalla. Ratakireys telojen 1 ja 2 välillä kasvaa, mutta ratakireys telojen 2 ja 3 välillä pysyy samalla tasolla staattisessa tilassa. Koetilanteessa paperin kosteuden ja kimmo-ominaisuuksien on oletettu pysyvän vakiona eri koeiden välillä. Koska suhteellinen vetoero on laskettu telojen pintaanopeudesta, voi myös nopeudesta riippuvainen telan ja radan välinen luisto aiheuttaa kireyseroa eri nopeuksilla. /22/.

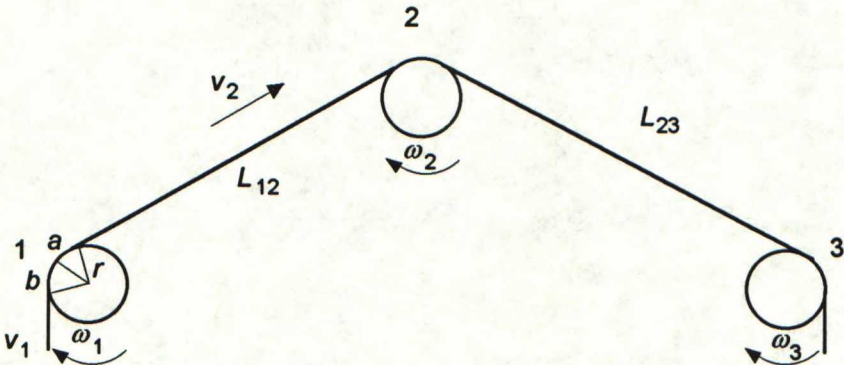


T2=Ratakireys telan 1 ja 2 välillä T3=Ratakireys telan 2 ja 3 välillä
(a) □ - V=13 m/min (b) ◇ - V=21 m/min (c) △ - V=25 m/min

Kuva 3–6. Painokoneella tutkitun vetoeron vaikutus ratakireyteen. /22/.

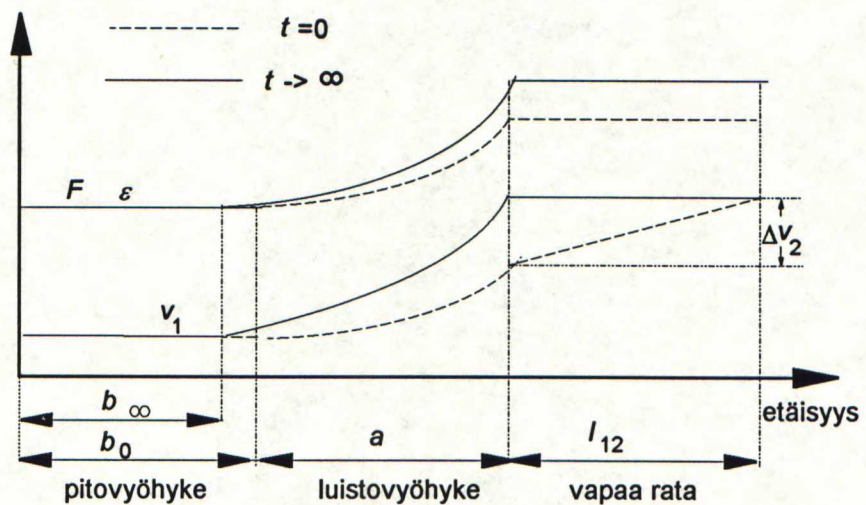
3.3.1 Kireyden käyttäytyminen muutostilanteessa

Edellä todettiin ratakireyden staattisessa tilassa määräytyvän telojen nopeuseron funktiona. Tarkastellaan ratakireyden käyttäytymistä nopeusmuutoksessa käyttäen apuna kuvan 3–7 mukaista kolmen telan muodostamaa systeemiä vastaavin merkin-



Kuva 3–7. Kolmen telan muodostama systeemi

Kuvassa 3–8 on esitetty ratanopeuden ja –venymän käyttäytyminen, kun telan 2 pyörimisnopeutta ω_2 muutetaan askelmaisesti. Vaaka-akselilla on esitetty ratapisteen etäisyys telan 1 ja radan kontaktipinnasta. Katkoviivalla on esitetty suureiden käyttäytyminen muutostilanteen alussa ($t=0$), yhtenäisellä viivalla nopeusmuutoksen jälkeisessä vakiotilassa ($t \rightarrow \infty$). Telan 1 pitovyöhykkeellä säilyvät radan nopeus ja venymä ennallaan. Luistovyöhykkeellä venymä ja nopeus kasvavat etäisyyden funktiona, ja luistavan vyöhykkeen pituus a kasvaa pitoalueen b vastaavasti pienentyessä ajan funktiona. Telojen välissä olevan vapaan radan L_{12} ratanopeus kasvaa lineaarisesti paikan funktiona kuvan 3–8 katkoviivan mukaisesti venymän pysyessä vakiona koko välillä L_{12} . Ajan kuluessa ratanopeus lähestyy vakioarvoa koko vapaan radan matkalla. Muutos vakionopeuteen tapahtuu ratanopeuden ja ratavälin pituuden määräämällä aikavakiolla L_{12} / v_2 . Radan venymä ja siten myös kireys säilyy rataetäisyyden suhteen vakiona kasvaen kohti lopputilan arvoa edellä mainitulla aikavakiolla. /20/.



Kuva 3–8. Radan käyttäytyminen muutostilanteessa.

Edellä kuvatun perusteella nopeuden muutostilanteissa vapaan paperiradan kireyden määrää siten yhtälö:

$$\Delta F_{12} = EA_0 (1 - e^{-(V_0/L) t}) \frac{\Delta V_2}{V_0} \quad (3.5)$$

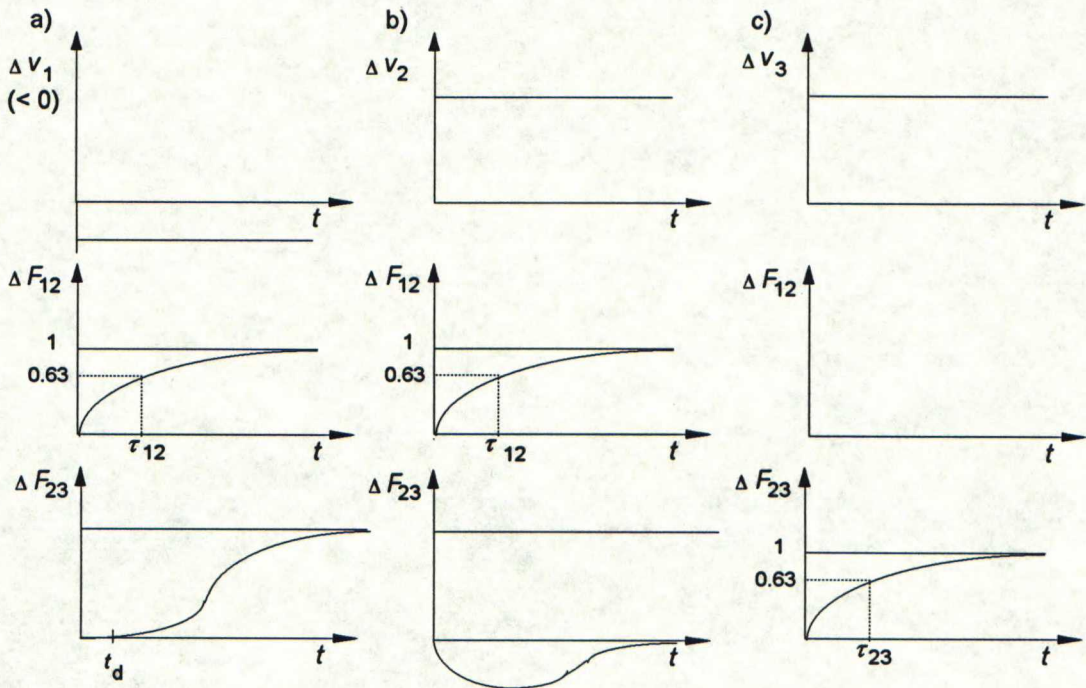
missä on approksimoitu $v_2 \approx V_0$ nopeusmuutoksen ollessa pieni suhteessa toiminta-nopeuteen V_0 . Lisäksi nopeuden v_1 oletetaan pysyvän vakiona. Laplace-tason yhtälönä saadaan siirtofunktio ratakireyden F_{12} muutokselle nopeuden v_2 muuttuessa

$$\frac{\Delta F_{12}(s)}{\Delta V_2(s)} = \frac{EA_0}{V_0} \frac{1}{(L/V_0)s + 1} \quad (3.6)$$

Kuvan 3–9 kaltaiseen systeemiin eri teloille annetun askelmaisen nopeusmuutoksen vaikutus radan eri osissa on havainnollistettu kuvassa 3–9 a) – c). Yksinkertaisin tilanne todetaan tilanteessa c) nopeuden v_3 muuttuessa; ryhmää edeltävän radan kireys F_{23} muuttuu ratavälin määräämällä aikavakiolla $\tau_{23} = L_{23}/V_0$. Luistovyöhykke telassa 2 kasvaa pitovyöhykkeen pienentyessä. Kireysmuutos ei siirry ratavälille 1–2, mikäli telan 2 pitovyöhyke säilyy.

Kohdassa a) nopeuden v_1 negatiivinen muutos aiheuttaa kireyслиsän ratavälillä L_{12} . Kireysmuutos siirtyy radan kulkusuunnassa eteenpäin seuraavalle ratavälille. Siirtymään liittyy myös kuollut aika $t_d = b_2/V_0$ joka siis johtuu radan kulusta telan ja radan kontaktipinnan läpi. Kuolleen ajan merkitys on vähäinen telahalkaisijan ollessa pieni suhteessa vapaan radan pituuteen, ja voidaan siten jättää useimmissa tapauksissa tarkastelun ulkopuolelle.

Kohdassa b) annettu nopeuden v_2 muutos vaikuttaa rataväleille telan molemmiin puolin, jolloin kireysmuutokset kumoavat toisensa välillä L_{23} tasapainotilassa.



Kuva 3–9. Ratakireyden käyttäytyminen nopeusaskeleessa. Merkinnot kuten kuvassa 3–7.

Yhteenvedona edellä kuvatusta voidaan kolmen telan muodostamalle systeemille siten todeta:

- negatiivinen nopeusmuutos ensimmäisellä telalla näkyy kireystason muutoksena radan kulkusuunnassa eteenpäin
- positiivinen nopeusmuutos keskimmaisella telalla muuttaa kireystasoa pysyvästi telaa edeltävällä ratavälillä sekä aiheuttaa kireyshäiriön radan kulkusuunnassa eteenpäin
- positiivinen nopeudenmuutos viimeisellä telalla saa aikaan kireysmuutoksen ainoastaan telaa edeltävällä ratavälillä mutta ei vaikuta kireyteen taaksepäin radan kulkusuunnassa, mikäli edeltävän telan ja radan kontakti on pitävä

3.4 Nopeussäädetyn ryhmän dynamiikka

Edellä esitettiin telaparin pyörimisnopeuksien ja ratavoiman välinen yhteys sekä vakio- että muutostilassa. Telan pyörimisnopeuden ja sille syötetyn akselimomentin yhteys saadaan riippuvuudesta

$$M = J \frac{d\omega}{dt} + F_{\mu\text{tot}} r \quad (3.7)$$

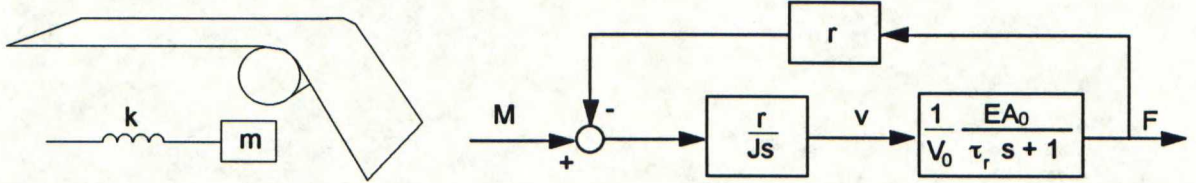
missä J on kuorman hitausmassa, $F_{\mu\text{tot}}$ kitkavoimat sekä r telan säde. Kun kitkavoimat jätetään tarkastelun ulkopuolelle saadaan Laplace-tasossa nopeuden ja momentin väliseksi siirtofunktioksi

$$\frac{V(s)}{M(s)} = \frac{r}{Js} \quad (3.8)$$

Paperirata ja tela muodostavat kuvan 3–10 kaltaisen jousi-massa-systeemin, jossa ratavoima F vaikuttaa takaisinkytkentänä vastamomentin $M_r = Fr$ moottorin akselille. Järjestelmä muodostaa värähtelevän systeemin jolle voidaan määrittää toisen asteen siirtofunktio muotoa

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.9)$$

missä ω_n on systeemin ominaisvärähtelytaajuus ja ξ vaimennuskerroin.



Kuva 3–10. Radan ja telan muodostama värähtelevä systeemi. Symbolien selitykset kaavan 3.10 yhteydessä.

Kuvan systeemille saadaan siten telaa pyörittävän momentin ja ratavoiman väliseksi yhteydeksi

$$\frac{F(s)}{M(s)} = \frac{\frac{1}{r} \left(\sqrt{\frac{EA_0 r^2}{V_0 J \tau_r}} \right)^2}{s^2 + 2 \sqrt{\frac{V_0 J}{4 \tau_r EA_0 r^2}} \sqrt{\frac{EA_0 r^2}{V_0 J \tau_r}} s + \left(\sqrt{\frac{EA_0 r^2}{V_0 J \tau_r}} \right)^2} \quad (3.10)$$

missä

- F = rataan kohdistuva voima [N]
- M = telaa pyörittävä akselimomentti [Nm]
- r = telan säde [m]
- EA_0 = radan kimmokerroin [N]
- V_0 = ratanopeus [m/s]
- J = telan ja voimansiirron yhteenlaskettu hitausmassa [kgm²]
- τ_r = radan aikavakio L/V_0 [s].

Systeemin ominaistajuudeksi ω_n saadaan siten

$$\omega_n = \sqrt{\frac{EA_0 r^2}{JL}} \quad (3.11)$$

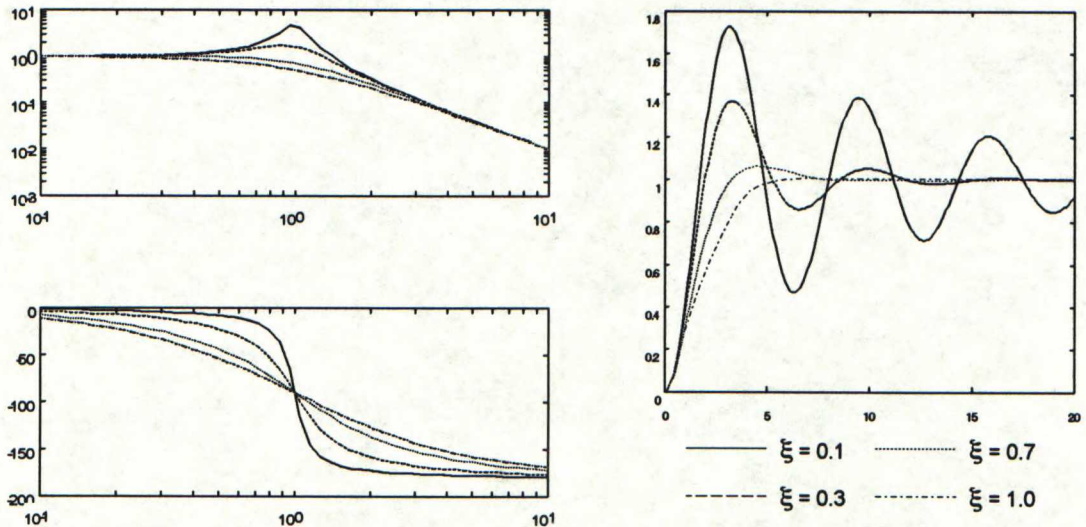
ja vaimennukseksi ξ

$$\xi = \frac{V_0}{2r} \sqrt{\frac{J}{EA_0 L}} \quad (3.12)$$

Systeemin vaimennuskertoimen on suoraan verrannollinen ratanopeuteen sekä kääntäen verrannollinen ratavälin pituuteen. Radan rajanopeudeksi, jolla vaimennus $\xi \geq 1/\sqrt{2} \approx 0.7$ voidaan määrittää [23]

$$v_r = \sqrt{\frac{2EA_0 r^2 L}{J}} \quad (3.13)$$

Kuvassa 3–11 on esitetty vaimennuskertoimen sekä järjestelmän askelvasteen välinen yhteys. Pieni vaimennus näkyy taajuustasossa resonanssipiikkinä ja askelvasteessa hitaasti vaimenevana värähtelynä.



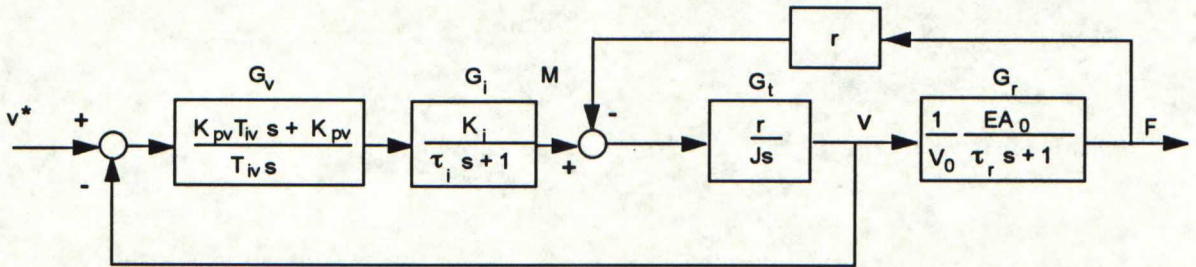
Kuva 3–11. Vaimennuskertoimen ja askelvasteen välinen yhteys

Esimerkinomaisesti voidaan laskea vaimennuskertoimen ja ominaisvärähtelytaajuus raskaalle ryhmälle, jonka parametriarvot ovat $EA_0=2 \cdot 10^6$ N, $r=0.915$ m, $L=6$ m ja $J=55\,000$ kgm². Saadaan $\omega_n=2.3$ rad/s ($f_n=0.36$ Hz), $\xi=0.037 \cdot V_0$ ja $v_r=1140$ m/min (19 m/s). Nähdään, että radan dynamiikka on hallitseva vielä suhteellisen suurillakin nopeuksilla, jolloin värähtelytaajuiset häiriöt voivat olla mahdollisia.

Nopeussäädetyssä systeemissä nopeussäätäjä antaa momenttiohjeen momenttisäätäjälle pyörimisnopeuden ohje- ja oloarvon välisen erotuksen perusteella. Nopeuden PI-säätäjä voidaan tunnetusti esittää siirtofunktioesityksenä

$$G_v(s) = K_{pv} \left(1 + \frac{1}{T_{iv}s} \right) \quad (3.14)$$

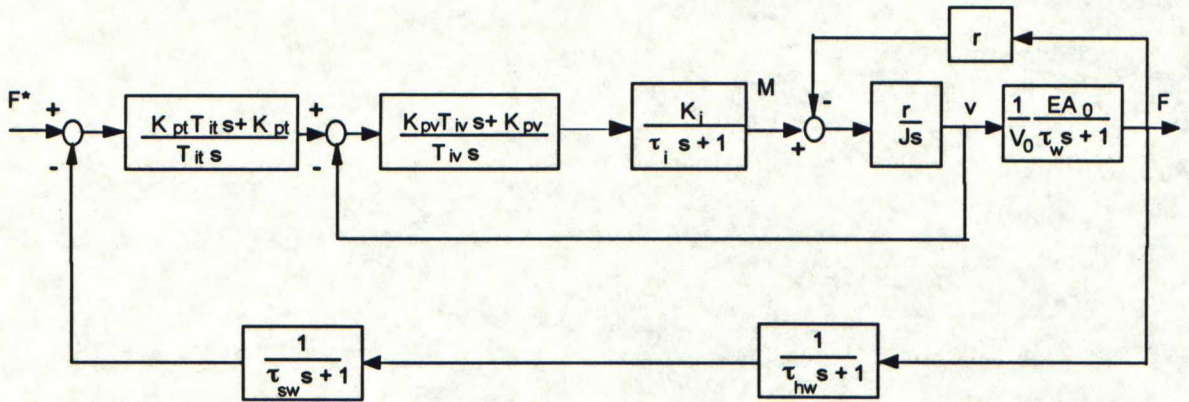
missä K_{pv} on säätäjän suhteellinen vahvistus ja T_{iv} integrointiaika. Kuvassa 3-12 on esitetty nopeusohjatun systeemin lohkokaavio. Momenttisäätäjä on oletettu nopeussäätäjää huomattavasti nopeammaksi ja esitetty ensimmäisen kertaluvun hitauspiirinä, jolla on aikavakio τ_i ja vahvistus K_i .



Kuva 3-12. Nopeussäädetyin systeemin lohkokaavio

3.5 Kireyssäädetty ryhmä

Kuvassa 3-13 on esitetty kireyssäätäjällä varustetun ryhmän lohkokaavio jatkuvana järjestelmänä. Kireyssäätäjän lisäksi systeemin dynamiikkaan vaikuttavat kireysmitauksen suodatus, joka voidaan toteuttaa joko anturin mittausvahvistimessa tai säätäjäyksikössä, tai osittain molemmissa. Edellistä suodatusaikavakiota on lohkokaaviossa merkitty τ_{hw} ja jälkimmäistä τ_{sw} .



Kuva 3–13. Kireyssäädetyin ryhmän lohkokaavio.

Kireyssäädetyin systeemin kokonaisvahvistukseen vaikuttaa kireyssäätöpiirin vahvistuksen lisäksi radan kimmokerroin. Käytännössä nopeussäädön vahvistus viritetään ilman rataa halutun nopeusvasteen mukaiseksi, ja kireyssäädön ominaisuudet toteutetaan virittämällä K_{pt} ja T_{it} sopivaksi. Koska kimmo-ominaisuuksien vaihtelut lajinvaihdon sekä radan kosteuden muutosten vuoksi voivat olla hyvin suuriakin, voi säätöpiirin kokonaisvahvistus vaihdella merkittävästi.

3.6 Häiriötekijät

Edellä kuvattu systeemi sisältää useita eri tyyppisiä häiriölähteitä, jotka rajoittavat järjestelmän toimintaa. Osa häiriöistä liittyy mekaanisen järjestelmän epäideaalisuuksiin, jollaisia ovat esimerkiksi voimansiirrossa käytettävien akselien joustavuus tai telan ja radan välinen luisto. Osa häiriöistä on puolestaan lähtöisin tuotantoprosessin vaatimista ajotoimenpiteistä, kuten rullanvaihdosta tai päällystykseen aloituksesta. Luvun 2 lopussa kuvattiin jo kireysmittauksen ongelmia ja häiriöitä. Seuraavassa on kuvattu muita tyypillisiä linjakäyttöjen toimintaan vaikuttavia häiriölähteitä.

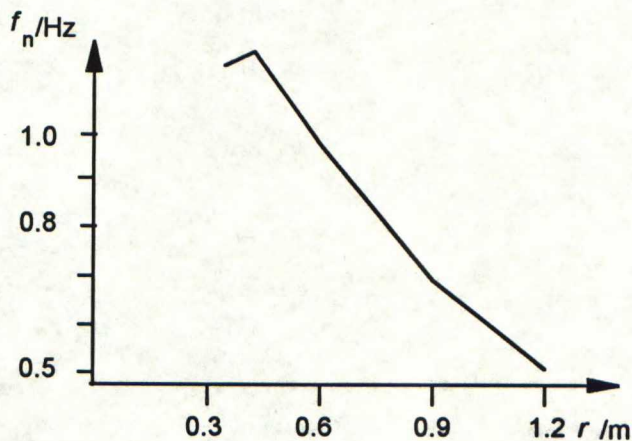
3.6.1 Rullainkäyttöjen häiriöt

Rullaimilla rullanvaihto muodostaa prosessissa epäjatkuvuuskohdan, joka yleensä aiheuttaa kireystransientin rataa. Tärkeää on, ettei rata pääse löystymään liikaa, jolloin se helposti ohjautuu telojen väliin aiheuttaen ratakatkon. Kiihdytyksissä ja

hidastuksissa ryömintä- ja tuotantonopeuksien välillä siirtyminen vakionopeuteen aiheuttaa rataa kireyshäiriön. Häiriön suuruuteen voi vaikuttaa lisäävästi, mikäli käytön momentti muutostilanteessa vaihtaa suuntaa. Tällöin tasasähkökäytöllä sillanvaihto sekä vaihtosähkökäytöllä dynaamiset ominaisuudet nollamomentin tun- tumassa sekä mekaanisen järjestelmän välykset ovat ylimääräisenä häiriötekijänä. Päälystyskonekäytöissä pyritään sopivalla mitoituksella ja riittävällä kireystasolla pitämään käyttö generaattorin puolella myös kiihdytyksen aikana.

Jälkikäsitteilykoneilla kiihdytyksissä ja hidastuksissa ajetaan konetta rata päällä läpi koko nopeusalueen. Tältä alueelta voi löytyä hankalia koneen resonanssitajuuksia, jotka kulkeutuvat kireyssäätöpiiriin mittaustelojen kautta.

Auki- ja kiinnirullaimilla hitausmassa muuttuu rullan säteen funktiona. Siten myös kappaleessa 3.4 esitetyn värähtelevän systeemin ominaisvärähtelytaajuus muuttuu prosessin aikana. Kuvassa 3-14 on esitetty esimerkki kaavan 3.11 mukaisen värähtelytaajuuden liikkumisesta rullan säteen funktiona, kun mekaniikan ja tam- puurin hitausmassa on $J_t = 352 \text{ kgm}^2$, rataleveys $l = 9 \text{ m}$, paperin tiheys $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, tampo- uurin säde $r_0 = 0.28 \text{ m}$, rullan maksimisäde $R = 1.2 \text{ m}$ vapaan radan pituus $L = 6 \text{ m}$ ja kimmokerroin $EA_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ N}$. Kireyssäätäjä tulee virittää pahimman mahdollisen tilanteen mukaan eli siten, että se on tunnoton alimmalla mahdollisella ominaisvärähtelytaajuudella.

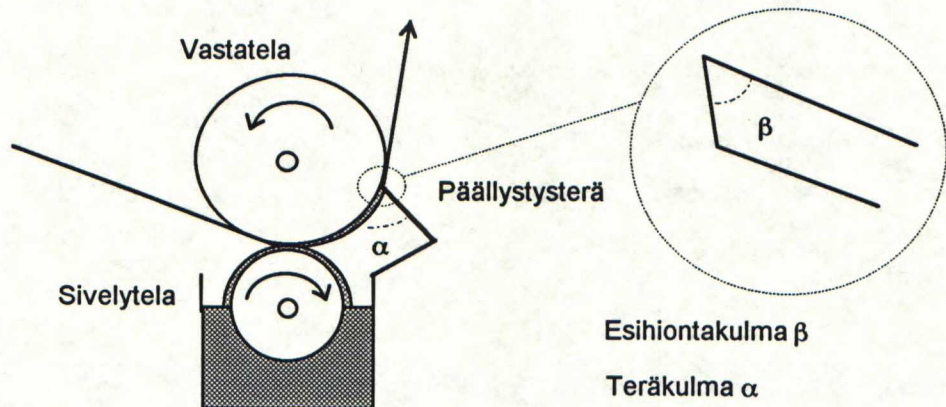


Kuva 3-14. Rullaimen ja radan ominaisvärähtelytaajuus rullan säteen funktiona

3.6.2 Päällystysterät ja puhdistuskaavarit

Paperi -ja päällystyskoneissa tela- ja sylinteripintojen puhdistukseen käytettävät kaavinterät aiheuttavat kuormituslisän, joka toisinaan joudutaan kompensoimaan lisämomenttiosuudella. Ongelmatilanteen aiheuttaa hetki, jolloin kaavinterä painetaan telaan kiinni tai irrotetaan siitä, jolloin kuormitus muuttuu äkillisesti. Lisäksi kaavinteriä oskilloidaan roskista aiheutuvien kulumisraitojen välttämiseksi, jolloin ryhmälle aiheutuu jaksollista sinimuotoista kuormitusta.

Päällystyskoneilla päällistuksen aloitus ja lopetus aiheuttavat häiriön päällistysryhmän kuormitukseen sekä ratakiireyteen. Kuvassa 3-15 on esitetty tyypillinen teräpäällistysasema. /24/. Vastatela välittää rataa tarvittavan momentin, pasta- eli sivelytelan tehtävä on sivellä päällistyspasta paperirainaan. Päällistysterällä poistetaan liiallinen pastamassa sekä painetaan pasta radan sisään. Aseman ollessa auki on vastatela yksin kosketuksissa rataa. Aseman kiinnimeno tapahtuu yleensä kaksivaiheisesti: päällistysterä painetaan kiinni rataa vastatelan kohdalla, jonka jälkeen sivelytela ajetaan lähes kiinni vastatelaan ja päällistys alkaa. Näin tehdään, jottei liiallista pastakerrosta pääsisi kulkeutumaan koneen läpi. Vastaavasti aseman aukaisu tapahtuu päinvastaisessa järjestyksessä. /25/.



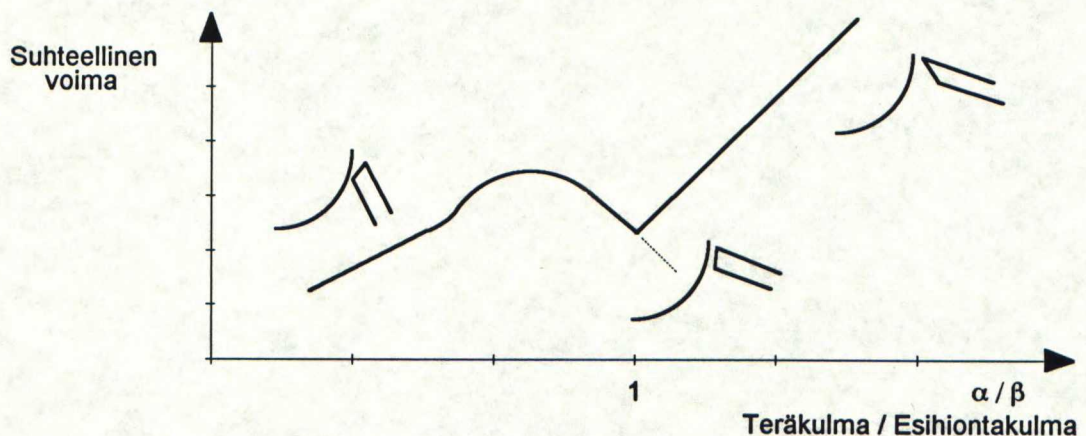
Kuva 3.15. Tyypillinen teräpäällistysasema.

Päällistys- tai kaavinterä aiheuttaa vastatelalle momentin

$$M_B = F_B r = \mu q l r \quad (3.15)$$

missä F_B on terävoima, r telan säde, μ terän ja paperin tai terän ja telapinnan välinen kitkakerroin, q terän aiheuttama viivapaine ja l terän leveys.

Terän aiheuttama vastamomentti on suurempi ennen sivelytelan mukaantuloa, sillä pastattoman paperin kitkakerroin terän alla on huomattavasti suurempi kuin määrällä pastalla päällystetyn. Siten lisäkuormitus kyseiselle ryhmälle tulee useassa vaiheessa, mutta toisaalta sivelytelan mukaantulo pienentää terän aiheuttamaa viivapainetta kitkakertoimen pienentyessä. Käyttöönottomittauksissa on kuivan radan ja terän aiheuttaman kuormituksen vastatelalle todettu olleen jopa nelinkertainen päällystyspastalla kostutettuun rataan verrattuna. Kuormitusmuutoksen kompensointiin käytetään suoraa momenttisäätäjälle annettavaa kompensointia, jonka suuruus määritellään kokeellisesti käyttönoton yhteydessä. Päällystystapahtuman vastatelalle aiheuttama kuormitus vaihtelee kuitenkin monen tekijän funktiona. Terän aiheuttama voima riippuu pääosin käytetystä terän viivapaineesta, terän kärjen esihiontakulmasta, terän elastisuudesta, teräkulmasta, sivelytelan ajoituksesta sekä terän liikkeen toispuolisuudesta leveyssuunnassa. Näistä esihiontakulman vaikutus on esitetty kuvassa 3-16. Esihiontakulmasta ei yleensä saada tietoa ohjausjärjestelmään. /25/.



Kuva 3-16. Esihiontakulman vaikutus päällystysterän kuormitukseen.

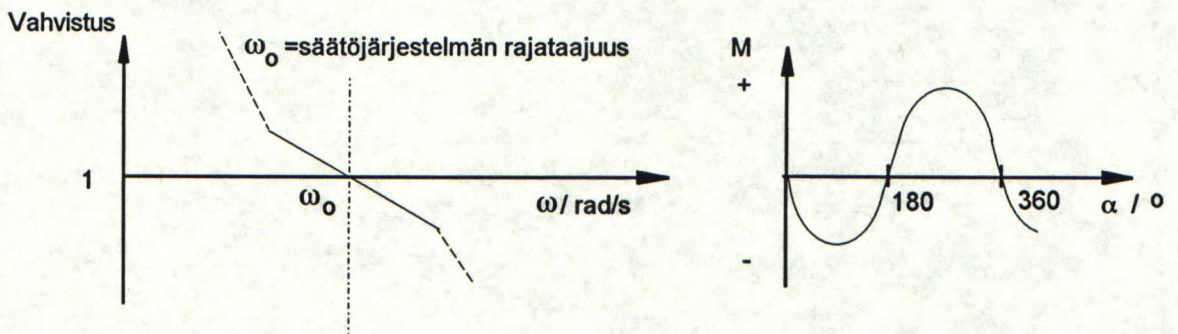
Jo edellämainittujen tekijöiden vuoksi päällystysterän kompensoinnissa joudutaan etsimään kompromissiarvo. Tämän lisäksi signaali päällystysten aloituksesta saadaan yleensä ennakkona, mutta aseman mekaaniset viiveet eivät pysy vakiona. Liian aikaisin annettu momenttillisiä aiheuttaa äkillisen kireysmuutoksen rataa, joka yhdessä jonkin telan vinon rintausten kanssa radan siirtymisen sivuttaissuunnassa johtaen mahdollisesti ratakatkoon. Toisaalta hieman pahempi tilanne aiheutuu myöhästyneestä kompensoinnista, jolloin rata pääsee löystymään ja löysää rataa pääsee telan ja terän väliin, jolloin terä tekee rataa viillon.

3.6.3 Pyörimistaajuiset häiriöt

Telan pyörimistaajuisia momentti- ja nopeushäiriöitä aiheuttavat muun muassa

- epäkeskeinen tai soikea tela tai rulla
- huonosti suunnattu kytkin
- epäkeskeinen vaihteisto
- kuluneet telapinnat, joita kaavitaan
- kuluneet laakerit
- huonot telakannatukset
- kuivatussylintereiden vesilasti

Edellä luetellut häiriöille on yhteistä, että ne aiheuttavat telan epäkeskeisen pyörimisen, jolloin ryhmän nopeus ja momentti vaihtelee täyden kierroksen aikana sini-muotoisesti kuvan 3-17 mukaisesti pyörimistaajuudella tai kaksinkertaisella pyörimistaajuudella. Häiriön kulmataajuus riippuu siten telan pyörimisnopeudesta. /26/. Erityisen ongelmallinen tilanne saattaa syntyä tela-rata-systeemin ominaistajuuden ja pyörimisnopeuksisen häiriön yhtyessä.



Kuva 3-17. Säättöpiirin vahvistuskäyrä ja pyörimistaajuinen häiriö.

Kuivatussylinterin vesilastin aiheuttama kuormitushäiriö esiintyy yleensä vain tietyllä nopeusalueella, jolloin sylinterin pohjalla oleva lauhdevesi pyrkii kiipeämään pitkin sylinterin sisäpintaa ja ryöppyä takaisin pohjalle. Ylitettäessä tietty nopeus, asettuu vesi keskipakoisvoiman vaikutuksesta tasaisesti sylinterin kehälle. Teoreettiseksi nopeudeksi, jolla tasainen lauhdekerros muodostuu, voidaan laskennallisesti määrittää

$$v_0 \geq \sqrt{5gr} \quad (3.16)$$

missä g on gravitaatiovakio ja r sylinterin säde. Kaavan mukaan pienin ajonopeus, jolla lauhdekerros on 1.8 m:n sylinterillä pysyvä, on siten 6.7 m/s. Lauhdevesikerroksen ollessa paksu nousee myös rajanopeus. /27/.

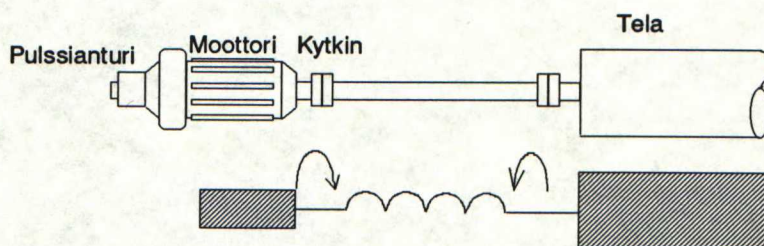
Mikäli jaksollisen häiriön taajuus on selvästi alhaisempi kuin säätöjärjestelmän rajataajuus, pyrkii järjestelmä korjaamaan havaitun poikkeaman. Seurauksena on haitallinen syklinen momentinkorjaus, mikä rasittaa laitteiston mekaniikkaa. Ongelma voidaan korjata joko poistamalla mekaaninen epätasapaino tai alentamalla säätöjärjestelmän rajataajuutta, toisin sanoen huonontamalla sen dynamiikkaa. Jälkimmäinen vaihtoehto ei luonnollisestikaan ole suositeltavaa, koska tällöin systeemin transientti-vaste huononee.

3.6.4 Akselivärähtely

Vääntövärähtely muodostaa yleisen ongelman tela-akseli-tyyppisissä systeemeissä. Telan hitausmassa ja kiertymissuunnassa joustava akseli muodostavat massajousi-systeemin, jolla on tietty ominaisvärähtelytaajuus. Kuvan 3-18 mukaisen kahden massan ja joustavan akselin ominaisvärähtelytaajuudeksi saadaan

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} \quad (3.17)$$

missä k akselin kimmomoduuli sekä J_1 ja J_2 moottorin ja telan hitausmassat.



Kuva 3-18. Värähtelevä mekaaninen systeemi.

Värähtelevän systeemin amplitudi on suurempi pienemmän massan päässä, kuvan systeemissä siis akselin moottorin puoleisessa päässä. Käytännön syistä pyörimisnopeuden oloarvon mittaamiseen käytetty pulssianturi joudutaan sijoittamaan moottorin päähän, jolloin ominaisvärähtely näkyy mittauksessa suuremmalla amplitudilla kuin todellisuudessa telan pyörimisnopeudessa. Tämä johtaa virheellisiin korjauksiin nopeudensäätöpiirissä, mikäli säätäjä on viritetty liian nopeaksi. /26/.

Suosittelavin keino vaimentaa akselivärähtelyjä on pyrkiä poistamaan häiriön aiheuttaja mekaanisesta systeemistä. Ominaisvärähtelytaajuuteen voidaan vaikuttaa käyttämällä jäykkiä ja lyhyitä akseleita, jolloin värähtelytaajuus saadaan nostettua säätöjärjestelmän rajataajuuden yläpuolelle. Mikäli tämä ei ole mahdollista, jää usein ainoaksi ratkaisuksi alentaa nopeussäätöpiirin rajataajuutta suodattamalla nopeusolomittausta tai pienentämällä säätäjän vahvistusta. Tämä luonnollisesti heikentää systeemin dynamiikkaa. ABB Drives suosittelee raskaille ryhmille yli 10 Hz:n ja kevyille ryhmille yli 15 Hz:n ominaisvärähtelytaajuutta. Tällöin nopeussäätöpiiri voidaan virittää riittävän nopeaksi toivotun askelvasteen aikaansaamiseksi.

Uudempaa ja osin kehitteillä olevaa tekniikkaa edustavat adaptiivinen nopeussäätö sekä resonanssitaajuuden aktiivinen suodatus. Adaptiivinen nopeussäätö toteutetaan tilahavaitsijalla, joka estimoi todellisen systeemin tilamuuttujia ja antaa momenttisäädölle tilatakaisinkytkennän. Perinteisellä tavalla toteutettu tilamuuttujasäätö edellyttää parametrien on-line identifiointia ja vaati melko suurta laskentakapasiteettia /28/. Resonanssitaajuuden aktiivisella suodolla pyritään eliminoimaan resonanssitaajuiset värähtelyt ja saavuttamaan siten nopeussäädölle korkeampi rajataajuus menettämättä systeemin stabiiliutta.

Edellä kuvattu kahden massan ja akselin muodostama systeemi on huomattava yksinkertaistus tilanteesta – käytännössä vaihteiston ja kytkimien muodostama järjestelmä synnyttää useita ominaistuuksia. Toiminnan kannalta kiinnostavin on kuitenkin järjestelmän alin värähtelytaajuus. Lisäksi akselin kimmomoduuli ei pysy vakiona vaan muuttuu kiertymiskulman funktiona. Rullaimilla kuorman hitausmassa muuttuu rullakoon mukana, kuivatusryhmillä joissa tehonsiirto sylintereiden välillä on toteutettu huovan avulla, voi huovan luisto muuttaa akseliilta näkyvää kuorman hitausmassaa. Toisaalta systeemissä esiintyy myös kitkoista johtuvaa vaimennusta, mutta ongelman periaate pysyy kuitenkin samana.

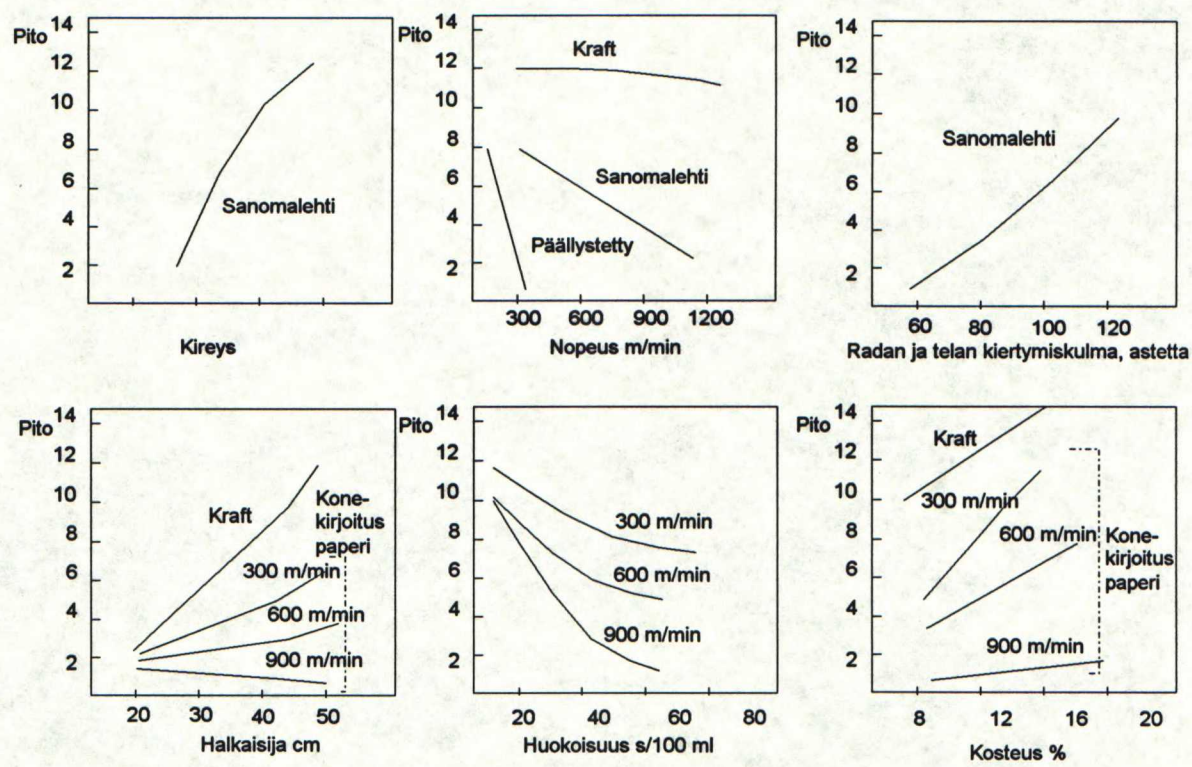
3.6.5 Välykset voimansiirrossa

Vaihteistovälyksellä tarkoitetaan vapaata pyörimissuuntaista liikettä vaihdelaatikon hammasrattaiden välissä tai akselin kytkimissä. Välys muodostaa systeemiin epäjatkuuskohdan momentin suunnanmuutoksessa. Tällainen tilanne voi esiintyä esimerkiksi hidastustilanteissa tai kun ratavoima vetää telaa ja käyttö pyörii lähellä nollamomenttia. Vaihteistovälys toimii herätteenä akselivärähtelylle synnyttäen välyksetöntä systeemiä alempitaajuisen värähtelytaajuuden. Välyksen aiheuttama värähtely rasittaa vaihteistokojeistoa ja voi pahimmassa tapauksessa johtaa sen nopeaan tuhoutumiseen. /26/. Hihnavälitteisessä ryhmässä hihnan luisto voi aiheuttaa välystä vastaavan ilmiön.

Vaativissa kohteissa voidaan käyttää erityisiä välyksettömiä vaihteita. Tämän lisäksi ryhmäsääätäjässä käytetään yleensä adaptiivista vahvistusta nollamomentin ympäristössä rauhoittamassa momentin suunnanvaihtoa. Toisaalta käytön jatkuva toimiminen nollamomentin tuntumassa kielii vääränlaisesta ajoprofiilista.

3.6.6 Luisto

Luisto on yleinen ongelma paperikonekäytöissä. Luistoa voi esiintyä telan ja radan, telan ja huovan sekä rullaimella tampusiraudan ja paperin tai eri paperikerrosten välillä. Telan ja radan välisen kontaktipinnan jakautuminen pito- ja luistovyöhykkeeseen esitettiin kappaleessa 3.2.1. Pitovyöhykkeen katoamisen voi aiheuttaa liian suuri kireysero telan eri puolilla tai yleisimmin radan ja telan pinnassa oleva ilma, joka radan ja telan väliin työntyessään etsii kuvan 3-20 a) mukaisesti helpoimman poistumistien. Nopeuden kasvaessa ilmaa puristuu väliin yhä enemmän. Mikäli paperi on huokoista, poistuu ilma radan läpi. Tiiviin päällystetyn paperin alle jäänyt ilma pyrkii nostamaan radan irti telasta, jolloin näiden välillä ei enää välity momenttia. Myös monet muut tekijät paperin huokoisuuden lisäksi vaikuttavat radan ja telan väliseen kitkakertoimeen, näiden vaikutusta on esitetty kuvassa 3-19. /29/.

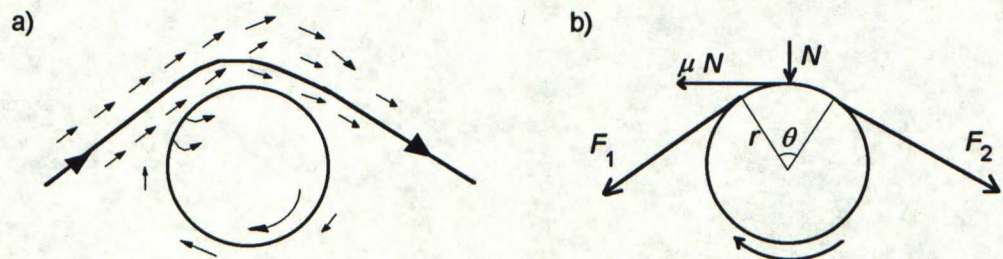


Kuva 3–19. Radan pito eri tekijöiden funktiona. /29/.

Telan ja radan välisen kitkakertoimen μ , ratavoimien F_1 ja F_2 sekä kiertymiskulman θ välinen riippuvuus määritellään yhtälöllä

$$\mu = \frac{1}{\theta} \ln \left(\frac{F_2}{F_1} \right) \quad (3.18)$$

missä merkinnät on määritelty kuvan 3–20 b) mukaisesti.



Kuva 3–20. a) Ilman aiheuttama luisto ja b) telan ja radan väliset voimat

Käyttötömällä telalla vakionopeudella kireyseron tulee olla suurempi kuin telan kitkavoimat, jotta se pyörisi ratanopeudella radan mukana. Yksinkertaistetusti voidaan olettaa kitkojen olevan pyörimisnopeudesta riippuvaisia, jolloin saadaan

$$F_2 = F_1 + \frac{J}{r} \frac{d\omega}{dt} + F_\mu(\omega) \quad (3.19)$$

Kiihdytystilanteissa osa ratavoimien F_1 ja F_2 erotuksesta kuluu inertian J kiihdytykseen, jolloin luiston todennäköisyys kasvaa. Tällöin käyttötömmän telan nopeus putoaa, ja ongelmatilanne saattaa syntyä, kun pito jälleen palaa esimerkiksi prosessimuutosten kautta. /22/.

Johtoteloilla on yleistä, että ne tietyssä nopeudessa (yleensä n. 300 m/min) menettävät pitonsa rataa. Usein on mielekästä antaa luiston tapahtua, jolloin nopeussäädetty ryhmä vain putoaa pois rataa kuljettavasta ketjusta. Kireyssäädetyissä ryhmissä luistoa ei saisi esiintyä lainkaan, koska tällöin kireyssäätäjä ajautuu todennäköisesti säätöalueensa laitaan. Kun pito rataa palaa, aiheuttaa tämä voimakkaan nykäisyn, johtaen mahdollisesti ratakatkoon. Luiston vuoksi kireyshäiriöt liikkuvat myös radan kulkusuuntaa vastaan pitäviksi oletettujen ryhmien läpi.

Käyttöryhmillä, jotka ovat toisiinsa mekaanisesti sidoksissa esimerkiksi huovan välityksellä, johtaa jonkin ryhmän luisto kuormituksen jaon epätasaisuuteen. Kiinnirullaimilla rullainsylinterin pito on erityisen tärkeää tasaisen rullan muodostamiseksi. Lisäksi rullakoon laskenta perustuu yleensä kantotelojen tai pope-rullaimen nopeuteen. Mikäli tämä rullain luistaa, harhautuu myös laskenta sotkien edelleen momenttisäädön skaalauksen sekä inertian kompensoinnin kiihdytystilanteissa. /13/.

Luistoa voidaan estää ja ehkäistä esimerkiksi urittamalla telan pinta, jolloin väliin pakkautuva ilma poistuu urien muodostamaa kanavaa pitkin. Kuormitusjoustop käytto nopeussäädössä korjaa myös telan nopeutta siten, että luistotilanteessa käytto pyrkii hakemaan telalle ratanopeutta vastaavan nopeuden.

3.6.7 Muut häiriöt

Kuten jo kappaleessa 3.4 todettiin, muodostavat paperirata ja tela systeemin, jonka ominaisvärähtelytaajuuden määräävät yhtälön 3.11 mukaisesti radan kimmokerroin, telan hitausmassa ja säde sekä ratavälin pituus. Tämä värähtelytaajuus ei pysy välttämättä vakiona. Radan kimmo-ominaisuudet muuttuvat rainan kosteusvaihteluiden

tai lajinvaihdon vuoksi, rullaimilla sekä rullan säde että hitausmassa vaihtelevat laajalla alueella. Lisäksi myös todellinen ratavälin pituus saattaa prosessin aikana muuttua pitävän ryhmän alkaessa luistaa tai päinvastoin.

Eräs kireyshäiriöiden lähteistä on päällystysyksiköiden jälkeiset leijukuivaimet, joiden puhallinsuuttimet voivat puhaltaa radan kiinni leijukuivaimeen kone- tai poikkisuunnassa. Seurauksena on kertaluonteinen tai mahdollisesti jaksollinen kireyshäiriö, joka jää kireyssäätäjän korjattavaksi.

Syöttöjännitteen heilahtelut voivat aiheuttaa momenttisäätäjälle häiriöitä, jotka voivat häiriön kestosta riippuen näkyä aina kireyshäiriöinä asti. Jännitehäiriöt voivat olla kertaluonteisia tai myös jaksollisia. Tasavirtakäyttöillä sillanvaihto muodostaa myös häiriölähteen prosessille.

4. KIREYDENHALLINNAN SIMULOINTIMALLI

Tietokonesimuloinnin tavoitteeksi voidaan määritellä mahdollisimman tarkka kohdeprosessin käyttäytymisen jäljitteleminen halutulla taajuusalueella. Simuloinnin perustana on kohteesta muodostettu matemaattinen malli. Simulointimallin luominen perustuu yleisesti tunnettuihin fysiikan lainalaisuuksiin ja kohdeprosessista kokemuseräisesti hankittuun sekä mittauksien kautta saatuun tietoon.

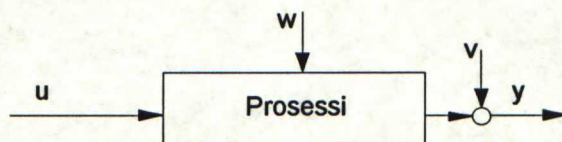
Simuloinnin avulla voidaan

- tutkia systeemin käyttäytymistä, kokeilla erilaisia toteutusvaihtoehtoja sekä säätö- ja ohjaustoimenpiteitä
- analysoida ongelmatilanteita
- kasvattaa prosessituntemusta

Käytännössä simulointimallia joudutaan yksinkertaistamaan useastakin syystä: kaikkia ilmiöitä ei täysin tunneta tai niiden vaihtelu on voimakasta, toisaalta tietokoneiden laskentakyky asettaa omat rajoituksensa. Tällöin malliin sisällytetään prosessin käyttäytymiseen olennaisesti vaikuttavat tekijät, epäolennaisia tekijöitä approksimoidaan sopivasti tai ne jätetään kokonaan pois. Tällöin on kuitenkin oltava selvillä kyseisten tekijöiden vaikutuksesta kokonaisuuteen ja siten mallin tarkkuuteen.

4.1 Yleistä prosessin mallintamisesta

Mallinnuksen kohteena olevan prosessin käyttäytymistä voidaan tutkia syöttämällä kuvan 4–1 mukaisesti järjestelmään tunnettu herätesignaali u ja mittaamalla järjestelmän vastetta y kyseiselle herätteelle. Tuntemattomia tekijöitä kuvataan satunnaisella nollakeskiarvoisella häiriöllä w , joka oletetaan lisäksi normaaliseksi ja riippumattomaksi. Lisäksi mittausvirheitä voidaan kuvata satunnaisella nollakeskiarvoisella häiriöllä v . /30/, /31/.



Kuva 4–1. Tutkittava kohdeprosessi.

Ideaalisessa tapauksessa tutkittava systeemi on

- vapaasti käytettävissä
- eristetty muista häiriötekijöistä
- lineaarinen ja aikariippumaton
- yleispätevä ja kattava

Usein kuitenkin käytännössä kokeille on tuotannollisista syistä rajoitetusti aikaa ja koejärjestelyissä kohdataan erilaisia ongelmia. Mekaanisessa järjestelmässä on vakioita, joiden suuruus vaihtelee laajalla alueella tai on lähes tuntematon. Käytännön järjestelmät sisältävät myös epälineaarisuuksia ja aikariippuvia tekijöitä. /32/.

Jotta systeemin dynamiikka saataisiin kunnolla esiin, on eduksi jos systeemiin voidaan syöttää selkeä herätesignaali. Tyypillisimpiä teollisuudessa käytettyjä identifiointisignaaleja ovat erilaiset askeleet tai sinimuotoiset signaalit. Usein käyttökelpoiseksi todettu heräte on ns. PRBS–signaali, joka koostuu sarjasta riippumattomia ja eripituksia yksikköaskelia. Tällainen signaali on lisäksi suhteellisen helppo generoida. /33/.

4.1.1 Ei-parametriset menetelmät

Lineaarista aikariippumatonta mallia voidaan kuvata sen siirtofunktion tai impulssivasteen avulla. Ei-parametriset menetelmät perustuvat herätteen ja vasteen aikatason tai taajuustason analyysiin. Aikatasossa voidaan tehdä päätelmiä esimerkiksi systeemin aikavakioista tai kertaluvusta tutkimalla systeemin askelvastetta. Taajuustason menetelmissä siirtofunktio tutkitavan dataparin välille muodostetaan signaaliparin sisältämän taajuusinformaation perusteella. Tällöin saadaan tietoa järjestelmän taajuuskaistasta sekä systeemissä mahdollisesti olevista resonanssitaajuuksista. /33/. Tietoa järjestelmän taajuusvasteesta voidaan käyttää

hyödyksi säätöjärjestelmää suunniteltaessa sekä ongelmatilanteiden, kuten esimerkiksi systeemissä esiintyvän värähtelyn syitä etsiessä.

Edellä mainittuja menetelmiä kutsutaan ei-parametrisiksi, koska niissä ei pyritä muodostamaan äärellistä parametristä systeemimallia. Ei-parametriset menetelmät eivät sovellu datalle, joiden välillä esiintyy takaisinkytkentää.

4.1.2 Parametriset menetelmät

Parametrisissa malleissa tutkittavan dataparin välille pyritään löytämään systeemiä kuvaava differentiaaliyhtälöesitys. Systeemille muodostetun matemaattisen mallin luotettavuutta voidaan arvioida tutkimalla mittauksesta saadun vasteen ja mallin avulla lasketun vasteen erotusta. Mallin todellisia parametreja voidaan siten identifioida etsimällä matemaattiseen malliin parametrit, joilla erotus saadaan minimoitua. Tämän ennustevirheen minimoimiseksi on kehitetty useita matemaattisia menetelmiä.

Mikäli halutaan tutkia puhtaasti prosessin herätteen ja vasteen välistä riippuvuutta voidaan käyttää yksinkertaisempia malleja. Tällöin ei olla kiinnostuneita prosessin sisäisestä käyttäytymisestä. Yleensä tällaiset mallit kuvaavat mitatun dataparin välistä riippuvuutta differentiaaliyhtälön avulla. Mallityypistä riippuen vastetta $y(t)$ selitetään herätteen $u(t-nk)$, vanhojen mittausten $y(t-na)$ sekä häiriötermin $e(t)$ avulla

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-d) + b_2 u(t-nk-1) + \dots + b_{nb} u(t-nk-nb) + e(t) + c_1 e(t-1) + \dots + c_{nc} e(t-nc) \quad (4.1)$$

jolloin kyseessä on ns. ARMAX-malli (Auto-Regressive Moving Average eXtraneous variable). Parametrit a , b ja c sovitetaan minimoimalla ennustevirhe jollakin tunnetulla menetelmällä. Kyseisen mallin konstruoiminen mitatulle dataparille ei vaadi tietoja prosessin fysikaalisesta rakenteesta. Identifioinnissa tarvitsee määritellä ainoastaan mukaanotettavien termien a , b ja c määrä na , nb ja nc sekä systeemin kuollut aika nk . ARX-malli on ARMAX-mallin yksinkertaisempi muoto, jossa häiriötermi on yksinkertaistetusti $e(t)$. /33/.

Mikäli järjestelmän sisäisestä käyttäytymisestä halutaan saada informaatiota, vaaditaan prosessin fysikaalisesta taustasta yksityiskohtaisempaa tietoa. Toisaalta

tällainen malli on yleispätevämpi ja sitä voidaan mahdollisesti soveltaa muuttuvissa prosessiolosuhteissa, kun parametrimuutokset tunnetaan. Tällaista estimointia varten voidaan muodostaa systeemin oletettu tilayhtälömalli, johon mittausdata sovitetaan.

Mikäli tutkittava data on kerätty systeemistä, jossa dataparin välillä esiintyy takaisinkytkentää esimerkiksi säätäjän kautta, tulee saatujen tulosten kanssa olla kriittinen. Tällöin on eduksi, jos systeemiin voidaan syöttää ylimääräisiä herätteitä, koska muutoin takaisinkytkentä köyhdyttää mittaustuloksissa olevaa informaatiota. Yleisesti parametriestimoivat mallit kuitenkin soveltuvat myös takaisinkytkettyyn dataan. /34/.

4.2 Toteutustyökalu

Simulointimallin toteutustyökaluna sekä mittausdatan analysointiin käytettiin Matlab/Simulink-ohjelmistoa. Matlab on tieteellinen matriisilaskentaohjelmisto, johon voidaan liittää erilaisia lisäohjelmistoja esimerkiksi signaalinkäsittelyn tarpeisiin. Simulink on Matlab-ohjelmistoon rakennettu graafinen käyttöliittymä, jolla voidaan muodostaa systeemimalleja lohkokaaavion muodossa. Graafisen käyttöliittymän etuja ovat sen havainnollisuus sekä joustavuus muutoksille, samalla kuitenkin tiedonkäsittelyn tarve ja siten myös tietokoneen kuormitus kasvaa.

Simulointiohjelmistolla pystytään käsittelemään sekä jatkuva-aikaisia että diskreetoituja järjestelmiä sekä myös epälineaarisia systeemejä. Järjestelmään voidaan syöttää tekstimuotoista kerättyä mittausdataa, jota voidaan käyttää simuloinnin syötteenä tai analysoida esimerkiksi edellisessä kappaleessa kuvatuin menetelmin. Ohjelmiston etuja ovat myös sen soveltuvuus PC-ympäristöön sekä hyvät graafiset ominaisuudet. Lisäksi ohjelmistoon voidaan lisätä erilaisia laajennuspaketteja suunnittelun tueksi sekä liittää C- tai Fortran- kielisiä makro-ohjelmia.

4.3 Kireyssäädetyn systeemin malli ja toteutus

Kireydenhallinnan simulointimallin perustaksi on valittu systeemin fysikaalisiin riippuvuuksiin perustuva matemaattinen malli, jonka perusteet todettiin edellisessä luvussa.

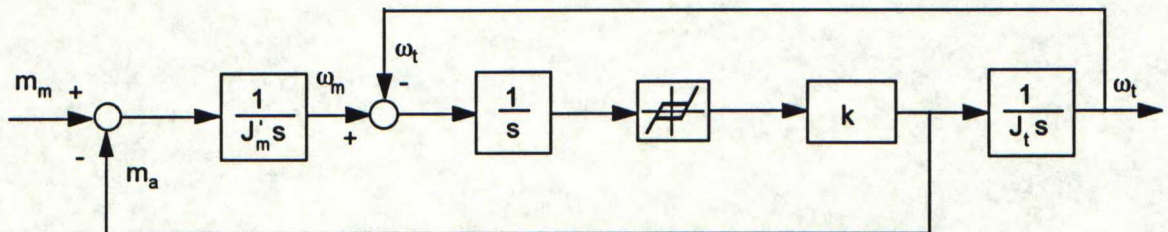
taiset lohkojen väliset erot toteutetaan parametriasetteluilla. Graafinen malli on joustava muutoksille ja laajennuksille. Ryhmien määrää voidaan helposti lisätä, rajoitukset asettaa yleensä tietokoneen laskentakapasiteetti. Mikäli lohkon sisältämään malliin tehdään muutoksia, voidaan muutetulla loholla korvata kaikki mallin vastaavat lohkot. Erilaisia häiriötekijöitä voidaan kuvata syöttämällä häiriösignaaleja haluttuun osaan järjestelmää.

Kuvattu malli voidaan jakaa mekaanisen järjestelmän sekä sähköisen (digitaalisen) ohjausjärjestelmän malliin, jonka raja voidaan vetää ryhmäsäätäjän ja moottorin välille. Seuraavassa on lyhyesti kuvattu lohkoihin sisällytetyt toiminnot sekä simulointiohjelmiston rakenne ja käyttöperiaate.

4.3.1 Mekaanisen järjestelmän malli

Mekaaninen järjestelmä sisältää ohjausjärjestelmää huomattavasti enemmän tuntemattomia tai laajalla alueella vaihtelevia parametreja. Järjestelmään kohdistuu myös pääosa ulkoisista häiriötekijöistä. Mekaanisen systeemin epäideaalisuudet ovat myös säätöjärjestelmän toimintaa rajoittava tekijä.

Moottoria ja voimansiirtoa kuvaavaan lohkoon on sisällytetty akselivärähtelyn sekä vaihteistovälyksen malli, joka on esitetty kuvassa 4–3.



Kuva 4–3. Tela–akseli–systeemin värähtelymalli.

Moottori tuottaa ryhmäsäätäjältä saamansa virtaan verrannollisen momentin (m_m). Moottorimomentin ja akselilla vaikuttavan momentin (m_a) erotus integroituu akselin moottorin puoleiseksi kulmanopeudeksi (ω_m). Joustavan akselin kiertymä saadaan integroimalla kuorman (ω_t) sekä moottorin kulmanopeuksien erotusta. Väly mallinetaan hystereesinä nollakiertymän läheisyydessä. Akselin joustavuuden määrää jousivakio (k). Kuorman näkemä akselimomentti integroituu telan pyörimisnopeudeksi. J_m ja J_t ovat moottorin ja telan hitausmassat.

Ryhmän kuorma on mallinnettu hitausmassana ja puhtaana integrointina sekä staattisina ja dynaamisina kitkavoimina. Siirtofunktioksi moottorin momentin ja pyörimisnopeuden välille voidaan lohkokaaviosta vällys huomoimatta johtaa

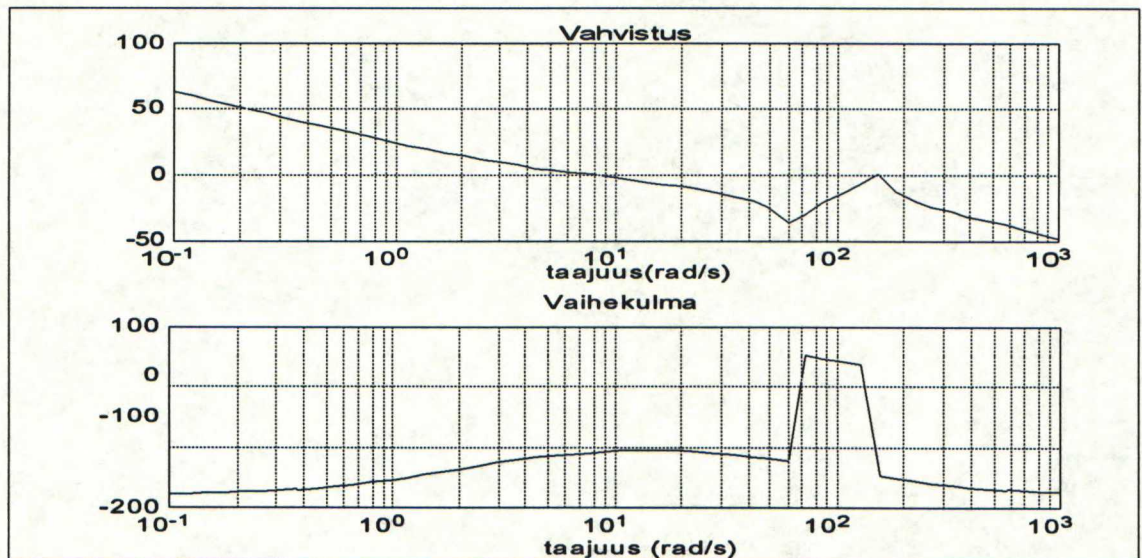
$$G_m(s) = \frac{J_m(s^2 + \Omega_{02}^2)}{s(s^2 + \Omega_{01}^2)} \quad (4.2)$$

missä

$$\Omega_{01} = \sqrt{k\left(\frac{1}{J_m} + \frac{1}{J_h}\right)} \quad (4.2a)$$

$$\Omega_{02} = \sqrt{\frac{k}{J_h}} \quad (4.2b)$$

jossa Ω_{01} on siis systeemin ominaisvärähtelytaajuus.



Kuva 4–4. Mekaanisen nopeusohjatun järjestelmän taajuusvaste.

Tyypillisen nopeusohjatun avoimen systeemin taajuustason esitys on kuvattu kuvassa 4–4. Mekaanisen systeemin integrointi aiheuttaa vahvistukseen -20 dB:n vaiennuksen dekadilla sekä -90° vaihesiirron. Siirtofunktion imaginääriakselilla sijaitsevat nollakohdat aiheuttavat vahvistusminimin taajuudella Ω_{02} vaiheen kasvaessa samalla 180° . Imaginääriakselilla olevat navat aiheuttavat puolestaan vasteeseen vahvistusmaksimin ominaisvärähtelytaajuudella Ω_{01} , jolloin vaiheessa tapahtuu -180

asteen vaihesiirto. Kun järjestelmään liitetään integroiva PI-säätäjä, laskee järjestelmän vaihe lähelle -180 astetta ominaistaajuudella ja systeemi on altis värähtelylle kyseisellä taajuudella. Käytännössä kitkojen aiheuttamat vaimennukset näkyvät napojen ja nollakohtien pienenä negatiivisena reaalisana, joka hillitsee mekaanista värähtelyä. /28/.

Radan venymän ja kireyden malli on toteutettu luvussa 3 esitettyä ratakireyden käyttäytymistä vastaten. Ratakireyden muutoksen aikavakio riippuu ratanopeudesta ja on siten epälineaarinen. Epälineaarisuus huomioidaan nopeuden toimintapisteenä, jolloin radan aikavakio määräytyy parametritietona annetun perusnopeuden mukaisesti. Venymälle voidaan antaa alkuarvo aikavakiolaskennan ohi, jolloin simulointi voidaan pakottaa nopeammin staattiseen tilaan ilman suuria alkutransientteja.

4.3.2 Ohjausjärjestelmän malli

Digitaalinen ohjausjärjestelmä sisältää monia toimintoja, joista systeemin dynamiikan kannalta merkittävimpiä ovat säätäjien toiminta sekä järjestelmäviiveet. Viiveet voivat olla suodatukselta johtuvia aikavakioita tai digitaalisen järjestelmän näytteenotosta johtuvaa kuollutta aikaa.

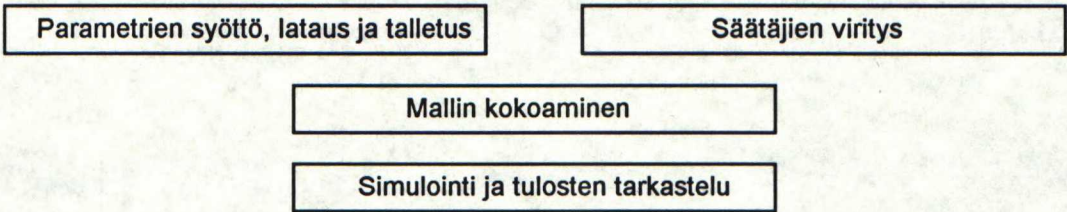
Ryhmäsäätäjä on approksimoitu jatkuvana järjestelmänä, vaikka se todellisuudessa on näytteistetty järjestelmä. Lyhyen näytteenoton simuloinnin laskennalle aiheuttama kuormitus on kuitenkin huomattavan suuri tarkkuuden parannuksessa saavutettavaan hyötyyn nähden. Ryhmäsäätäjän ominaisuuksista momenttisäätäjä on samasta syystä nopeussäätäjää huomattavasti nopeammalla aikatasolla toimivana jätetty mallintamatta. Nopeussäätäjän lähtö on rajoitettu, samoin integraaliosa. Malliin on lisäksi sisällytetty nopeuden eroarvon suodatus, adaptiivinen nollamomentin vahvistus sekä kuormitusjousto. Lohkoon voidaan myös tuoda suora momenttiohje.

Kireyssäätäjä on kuvattu diskreettinä PI-säätäjänä. Todellisen järjestelmän suotimet on sisällytetty malliin. Kireyssäätäjä voidaan kytkeä päälle haluttuna ajankohtana.

4.4 Simulointiohjelman toiminnan kuvaus

Simulointiohjelma koostuu Simulabin graafisen käyttöliittymän lohkopohjaisista malleista sekä Matlab–kielisistä apuohjelmista eli skripteistä. Skriptien avulla järjestelmään voidaan syöttää lähtötietoparametrit sekä virittää järjestelmän säätäjät. Tapauskohtainen simulointimalli voidaan muodostaa hakemalla valmis vakiopohja mallille ja muokkaamalla se graafisesti sovellusta vastaavaksi esimerkiksi ohje-arvoketjun osalta. Skriptien avulla järjestelmään voidaan syöttää lähtöparametrit sekä erilaisia häiriöitä ennalta määrättyinä ajankohtana.

Simulointi voidaan käynnistää komentoeditoritasolta tai grafiikkaeditorista, jolloin voidaan myös seurata yhden tai useamman signaalin käyttäytymistä. Simuloinnin jälkeen edeltä käsin määritellyjä signaaleja voidaan tarkastella graafisesti aika- tai taajuustasossa. Järjestelmän syötteeksi voidaan myös kytkeä ulkoinen, esimerkiksi kenttämittauksista saatu signaali.



Kuva 4–5. Kaavio simulointiohjelmiston toiminnasta.

4.4.1 Simulointimallin rajoituksista

Kuten edellä todettiin, järjestelmästä luotu matemaattinen malli on aina jonkinlainen yksinkertaistus todellisesta tilanteesta. Edellä mainitussa systeemimallissa ei luonnollisestikaan ole voitu ottaa huomioon kaikkia rakenteellisista ominaisuuksista johtuvia tekijöitä, jotka voivat olla lähteenä (usein korkeataajuisille) värähtelyille. Malliin sisältyy parametrejä, joiden suuruus vaihtelee laajalla alueella. Ongelmallisista näistä on paperiradan kimmomoduuli. Paperirata on mallinnettu täysin elastisena materiaalina, mikä pätee venymän ollessa pieni kuten luvussa 3.1.1 todettiin.

Eräs merkittävä yleistys käytännön järjestelmästä on todellisessa järjestelmässä esiintyvä telan ja radan välinen luisto, jonka sisällyttäminen malliin on hankalaa. Luistotapauksessa kireyshäiriöt siirtyvät myös radan kulkusuunnassa taaksepäin

luistavan ryhmän läpi. Myöskään todellisen järjestelmän ohjausteloja ei ole malliin sisällytetty, käytännössä ne lisäävät järjestelmän vaimennusta, koska tällöin (värähtely)energiaa kuluu ohjaustelojen ja radan välisiin kitkoihin.

Käytetyn tietokoneen kapasiteetti asettaa rajoituksia simulointiohjelman toiminnalle. Matlab muodostaa lohkokaavioesityksestä sisäisesti matriisimuotoisen differentiaaliyhtälöryhmän, jota se ratkaisee simuloinnin aikana jotakin tunnettua ratkaisualgoritmia käyttäen. Simuloitaessa laajaa usean ryhmän muodostamaa systeemiä matriisin koko kasvaa eksponentiaalisesti, ja laskentatarve lisääntyy vastaavasti. Simulointimalli kuten todellinen järjestelmä sisältää aikavakioita, joiden suuruudet ovat eri kertaluokkaa. Tällaisen systeemin sanotaan olevan ns. *jäykkä systeemi (stiff system)*. Jäykkä järjestelmä tuo ongelmia numeerisessa tarkkuudessa simuloinnin yhteydessä. Matlab tarjoaa useita erilaisia simulointialgoritmeja, joista osa on erityisesti suunniteltu jäykille järjestelmille. Pienet aikavakiot ja lyhyet näytteenottoajat vaativat myös tiheää laskentaa ja ovat siten aikaavieviä.

4.5 Tehdasmittaukset ja mallin vastaavuus

Ratakireyden käyttäytymisen tutkimiseksi mitattiin ratakireyden vastetta muutostilanteessa todellisessa prosessiympäristössä. Mittauksia suoritettiin käyttöönottojen yhteydessä Kymmene Oy:n Kaukaan sellunkuivatuskone KK2:lla sekä Yhtyneiden Paperitehtaiden Kirkniemen tehtailla uudelleenrullaimella. Kaukaan ohjausjärjestelmä oli toteutettu täysin hajautetulla järjestelmällä, Kirkniemen uudelleenrullaimella oli puolestaan perinteinen keskitetty ohjausjärjestelmä. Prosessimittausten kannalta tällä ei kuitenkaan ole merkitystä.

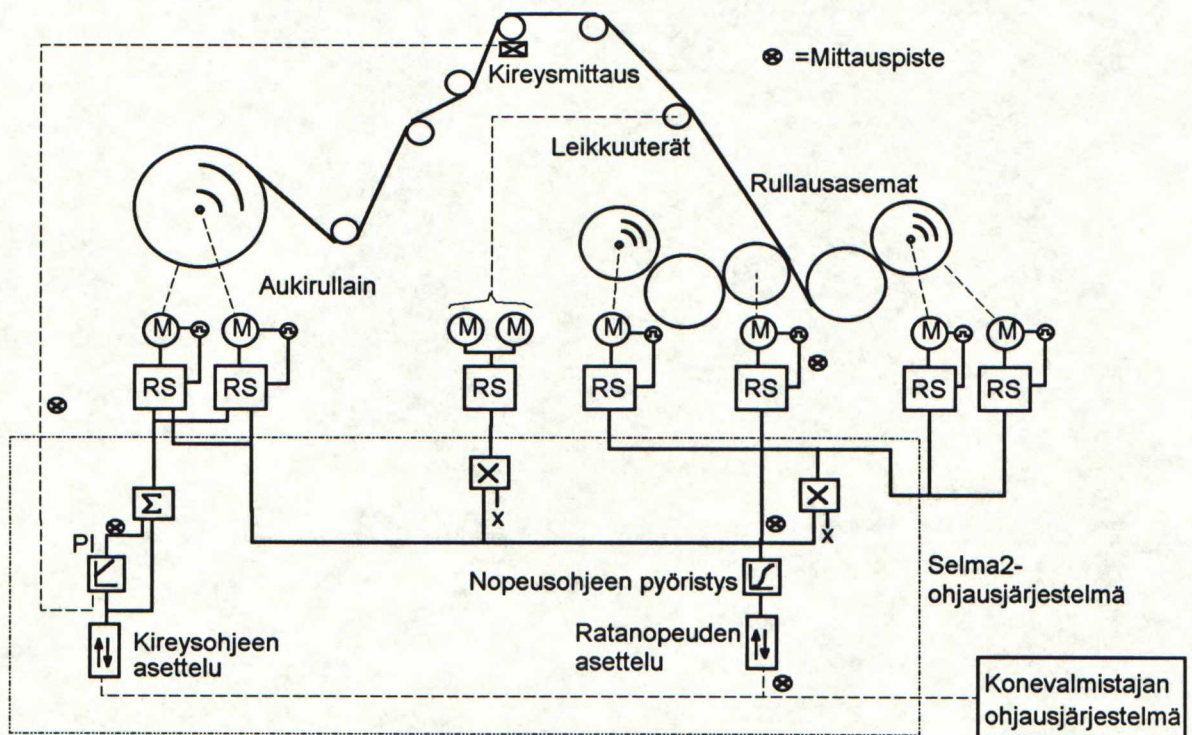
4.5.1 Sellunkuivatuskone KK2

Kaukaan sellunkuivatuskoneen mittauksia ei voitu tehdä kuin graafisessa muodossa, joten mitatun datan analysointi tietokoneella ei ollut jälkikäteen mahdollista. Mittauksen kohteeksi valittiin rataväli jossa oli myös kireysmittaus. Ainoa tähän soveltuva rataväli oli pitkä sekä rainan kosteus vaihteli radan matkalla merkittävästi. Mittaustulokset osoittivat kuitenkin kireyden muodostumisen aikavakiollisesti, tosin aikavakion suuruus ei vastannut teoreettista aikavakiota. Tämä saattaa selittyä mekaanisilla tekijöillä: raina kulki pitkän kuivatuskaapin läpi, jonka telat oli sidottu mekaanisesti

toisiinsa. Rata kiersi telojen ympäri jyrkässä kulmassa, jolloin ratakiureys todennäköisesti muodostui lyhyemmällä välillä kuin vetävien ryhmien välillä. Mittaustulokset suljetulla ja avoimella säätöpiirillä sekä mittauskohteen kaaviokuva on esitetty liitteessä 1.

4.5.2 Uudelleenrullainkone URK

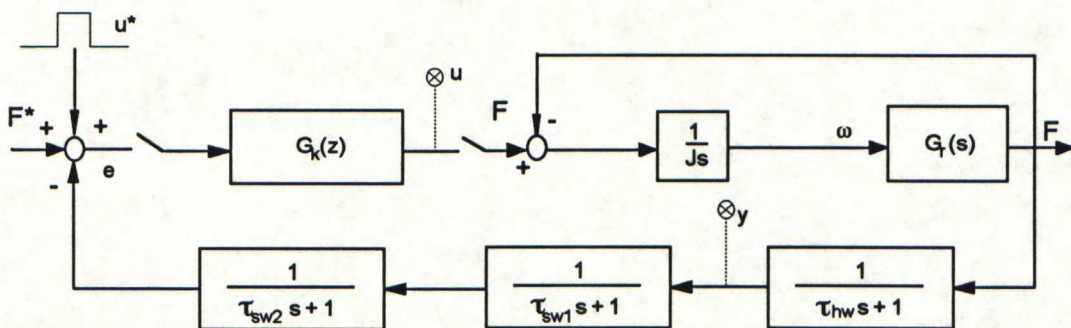
Uudelleenrullaimella ajetaan jo leikkurilta tulleita hylsille rullattuja paperirullia kapeammiksi asiakasrulliksi. Rullaimen kaaviokuva mittausjärjestelyineen on esitetty kuvassa 4–6. Rullaimen ohjausjärjestelmä on toteutettu keskitetyllä SELMA2 – automaatiojärjestelmällä. Mittauksia varten järjestelmään liitettiin lisäkortti analogiasignaalien lähdoille sekä sovellusohjelmaan tehtiin tarvittavat muutokset mittaustietojen lähettämiseksi. Analogiakortilta voitiin lähettää neljä analogiasignaalia 58 ms lähetysvälein. Ratakiureyssi signaali mitattiin suoraan anturin mittamuuntimelta. Mittaukseen käytettiin 486-mikrotietokonetta, johon oli asennettu mittauskortti ulkoisen analogisen datan mittauksia varten. Mittauksen lukemiseksi oli tehty sovellusohjelma, joka tallensi kerätyn datan tietokoneen kiintolevylle. Näin voitiin kerätä tietoa pitkäläkin ajanjaksolta.



Kuva 4–6. Tutkitun uudelleenrullaimen kaaviokuva ja mittausjärjestelyt.

Mittausten tarkoituksena oli lisäksi tutkia kiihdytyksessä ja hidastuksessa käytettävien ohjearvopyöristysten vaikutusta sekä ratakireyden muutosilmiöitä siirryttäessä kiihdytyksestä vakionopeuteen ja päinvastoin. Tavoitteena oli vähentää muutostilanteesta johtuvan kireyshäiriön suuruutta. Tämän vuoksi mitattaviksi signaaleiksi valittiin konevalmistajan ohjausjärjestelmältä tuleva nopeusohje, ryhmäsäättäjälle menevä Selma2-järjestelmässä pyöristetty nopeusohje sekä pääryhmänä olevan rullaustelan pulssianturilla mitattu nopeuden oloarvo. Aukirullaimen nopeuden mittausta ei ollut mielekäästä, koska pintanopeuden mittausta perustuu rullan säteen laskentaan eikä, sen tarkkuus ole siten kovin hyvä. Nopeuksien lisäksi mitattiin kireyssäättäjän lähtöä sekä kireyden oloarvoa. Maadoituksesta huolimatta mittaussignaalit olivat melko kohinaisia, erityisesti kireydenmittaus.

Radan ja rullaimen dynamiikka voitiin tutkia kireysmittauksesta ja säättäjän lähdöstä saadun signaalin avulla. Koska aukirullain on momenttisäädetty, vaikuttaa kireyssäättäjän lähtö suoraan ryhmäsäättäjän momenttiohjeeseen. Momenttisäädön ja moottorin aikavakiot voidaan olettaa merkityksettömän pieniksi, jolloin systeemin dynamiikan määräävät rullan hitausmassa, radan aikavakio sekä kireysmittauksen suoto. Kuollutta aikaa syntyy johtuen automaatiojärjestelmän tehtävän suoritusvälistä. Todellinen kuollut aika voitiin päätellä tutkittavasta signaaliparista.



Kuva 4–7. Mitatun dataparin lohkoavioesitys.

Tutkittavan systeemin lohkoavioesitys on esitetty kuvassa 4–7, missä $G_k(z)$ on diskreetti kireyssäättäjä ja $G_r(s)$ radan siirtofunktiio. Testisignaalinä annettiin kireysohjeeseen suora askelmainen 20% muutos; tätä kokeiltiin sekä täydellä että lähes tyhjällä rullalla. Varsinainen ohjaussignaali u mitattiin säättäjän lähdöstä. Systeemi ei luonnollisestikaan ole eristetty muilta ratakireyteen vaikuttavilta tekijöiltä, mutta näiden vaikutuksen voidaan olettaa olevan annetun ohjaussignaalin suuruuteen nähden huomattavasti pienempiä. Rullaustelan nopeusolo pysyi vakaana askelohjeen

aiheuttamasta kuormituksesta huolimatta, jolloin se ei päässyt vaikuttamaan ratakireyteen.

4.6 Mittaustulokset

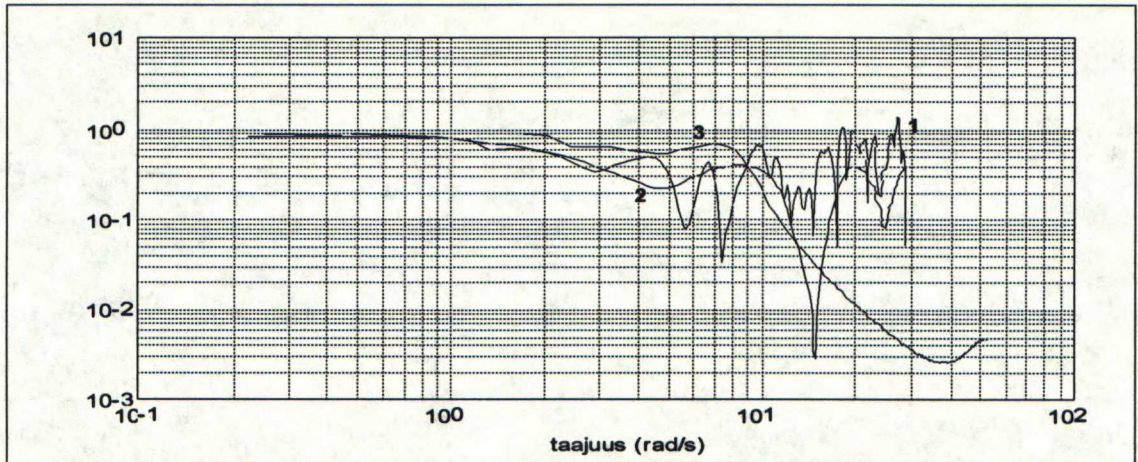
Ohjaussignaalia u ja vastetta y analysoitiin Matlabin System Identification Toolboxin avulla. Koska mittauksesta saatu datapari sisälsi säätäjän kautta takaisinkytkettyä informaatiota, katsottiin parhaaksi tutkia koko kireyssäädetyin systeemin vastetta, jolloin voitiin käyttää myös ei-parametrisiä menetelmiä. Dataparista e , u (kuva 4–7) identifioitiin ensin kireyssäätäjän siirtofunktio, jota verrattiin tiedossa olevien säätöparametrien avulla laskettuun diskretoituun siirtofunktioon. Säätäjä identifioitiin ARX-mallin avulla arvoilla $na=1$ ja $nb=2$. Mallin parametreiksi variansseineen saatiin

$$\begin{array}{ll} b_1 = 0.8796 \text{ (0.9)} & b_2 = -0.8545 \text{ (-0.888)} \\ \pm 0.0306 & \pm 0.0310 \\ \\ a_1 = 1 \text{ (1)} & a_2 = -0.9950 \text{ (-1.0)} \\ 0 & \pm 0.0028 \end{array}$$

Suluissa merkityt arvot ovat tiedetyistä säätäjäparametreista ($K_p=0.9$ ja $K_i=0.2$) laskennallisesti määritettyjä. Tulokset täsmäsivät todellisten parametrien kanssa hyvin, mikä ei sinänsä ole yllättävää lineaarisen säätäjäelimen kohdalla.

Suljettua systeemiä tutkittiin seuraavasti: uudeksi identifioitavaksi datapariksi valittiin säätäjälle ohjearvoksi kireydestä riippumaton testiaskel u^* sekä mitattu kireyden vaste y . Dataparille estimoitiin kireyssäädetyin piirin taajuustason esitykset joita verrattiin simuloimalla saatuun. Tulokset on esitetty kuvassa 4–8.

Ei-parametrinen taajuusanalyysi tehtiin laskemalla signaaliparille empiirinen siirtofunktioestimaatti (ETFE). ARX-mallin kohdalla on identifioitu säätäjän lähdön u ja vasteen y välinen siirtofunktio. Simuloidun järjestelmän data tuotettiin systeemistä muodostetun lohkokaaviomallin avulla.

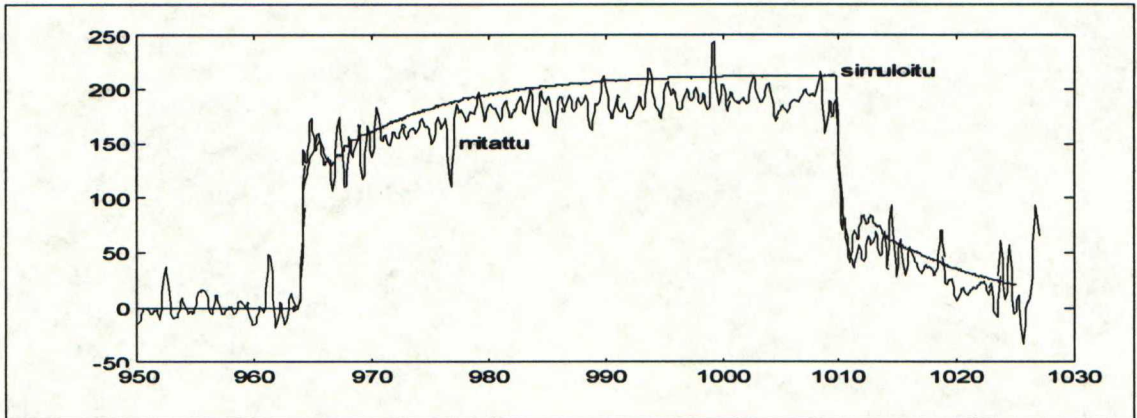


Kuva 4–8. Kireyssäädön vaste täydellä rullalla. 1) ETFE–menetelmä, 2) ARX–menetelmä, 3) simuloitu.

Systeemistä löytyi erilaisia resonanssitaajuuksia. Korkeataajuiset resonanssiipiikit voivat johtua rakenteellisista värähtelytaajuuksista, myös pyörimistaajuinen ($\omega=14$ rad/s) ja kaksinkertainen pyörimistaajuus osuvat tälle alueelle. Rullan ja radan ominaisvärähtelyn sekä kireyssäädön kannalta matalataajuinen alue on kuitenkin kiinnostava. Rullan ja radan ominaisvärähtelytaajuuteen viittaava resonanssiipiikki löytyy 8–10 rad/s kohdalta. Järjestelmää simuloimalla vastaavansuuruinen värähtelytaajuus saatiin myös näkyviin.

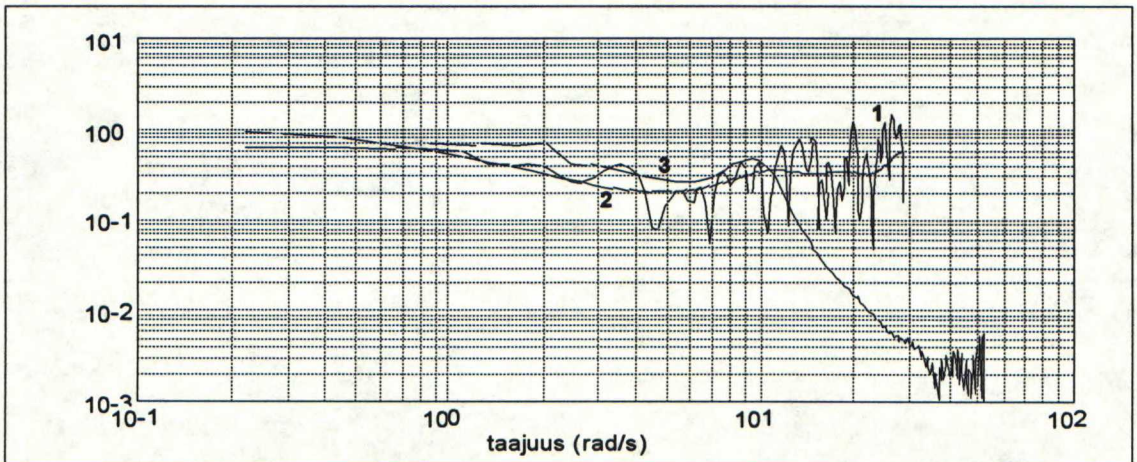
Simulointiparametreinä käytettiin $r=0.51$ m, $J_{\text{tot}}=215$ kgm², $V_0=7$ m/s, $L=11$ m $E=5700$ MN/m², $A_0=85.8 \cdot 10^{-6}$ m². Säättäjän parametreina käytettiin edellä todettuja arvoja, suodatusaikavakiot olivat $\tau_{\text{hw}}=0.64$ s, $\tau_{\text{sw1}}=0.3$ s ja $\tau_{\text{sw2}}=0.5$ s. Näistä epävarmin parametri on systeemin kimmomoduuli E . Kuten yhtälöstä kappaleen 3.4 yhtälöstä 3–11 voidaan todeta, määräytyy ominaisvärähtelytaajuus kimmokertoimen EA_0 mukaan. Mittauksen kohteena olleen paperin kimmomoduuli määriteltiin taulukkotiedon pohjalta, joten sen todellinen suuruus on epävarmaa.

Kuvassa 4–9 on esitetty simuloimalla saatu sekä todellinen kireyssäädetyin systeemin askelvaste.

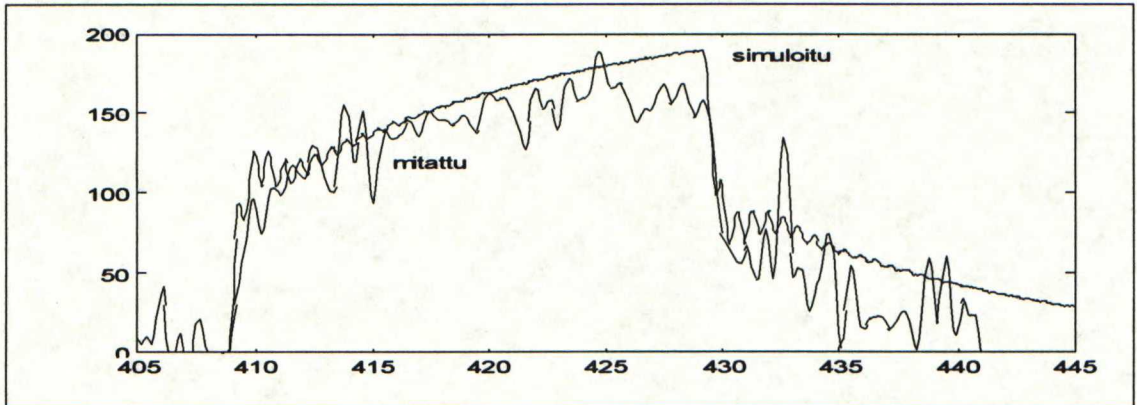


Kuva 4–9. Todellinen ja simuloitu askelvaste (täysi rulla).

Toinen askelkoe tehtiin lähes tyhjällä rullalla ja kireyssäätäjän vahvistuksella $K_p=0.6$. Tällöin hitausmassa koostuu lähes yksinomaan moottorin ja hihnapyörästä hitausmassasta, joiden yhteiseksi hitausmassaksi arvioitiin rullalle redusoituna 5 kgm^2 , rullan säde oli 0.1 m . Vastaavat tulokset kokeelle on esitetty kuvissa 4–10 ja 4–11.



Kuva 4–10. Kireyssäädön vaste lähes tyhjällä rullalla. 1) ETFE-menetelmä, 2) ARX-menetelmä, 3) simuloitu.



Kuva 4–11. Kireyssäädön askelvaste lähes tyhjällä rullalla.

4.7 Pohdintoja mittaustuloksista

Tehdyn analyysin perusteella ei vielä voida tehdä kovin kattavia johtopäätöksiä, mutta ne osoittavat systeemin resonoivan luonteen. Mittaukset laajemmalla nopeusalueella antaisivat radan käyttäytymisestä yleispätevää tietoa. Lisäksi avoimella kireyssäätösilmukalla ja monipuolisemmalla herätteellä radan dynamiikka saataisiin paremmin näkyviin. Systeemin identifiointia vaikeutti myös mittausdatan korkea häiriötaso, mikä kuitenkin kireysmittaussignaalin kohdalla on melko tavallista.

Systeemissä kireyssäätäjän ohjaus vaikutti suoraan momenttisäätöön. Nopeussäätöön vaikuttavan systeemin kohdalla tilanne olisi erilainen. Vastaavanlaiset mittaukset nopeussäädetyn systeemin vasteesta olisivat siten kiinnostavia. Lisäksi tällöin ryhmän nopeutta ja ratakireyttä mittaamalla saataisiin kireysvasteesta tarkempaa tietoa.

5. KIREYSSÄÄDÖN TUTKIMINEN MALLIN AVULLA

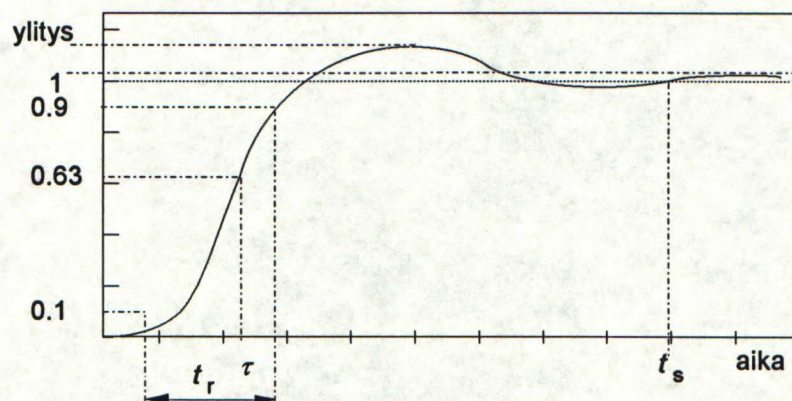
5.1 Säädetyin systeemin ominaisuudet

Säätöjärjestelmän suorituskykyä voidaan kuvata seuraavilla ominaisuuksilla:

- järjestelmän suhteellinen stabiilisuus
- järjestelmän vakiotilan tarkkuus
- järjestelmän transienttivaste

Takaisinkytketyssä järjestelmässä stabiiliudella ja transienttivasteella on selvä yhteys. Järjestelmän askelvasteen avulla voidaan tutkia säätöjärjestelmän hyvyttä muutostilanteessa esimerkiksi kuvan 5–1 mukaisilla kriteereillä:

1. Askelvasteen ylitys (%)
2. Nousuaika t_r : aika, jossa askelfunktion vaste nousee 10 %:sta 90 %:iin loppuarvostaan.
3. Asettumisaika t_s : aika, jonka jälkeen askelvaste asettuu tietyn prosentoin (yleensä 2 tai 5 %) sisään loppuarvostaan.
4. Aikavakio τ : ensimmäisen ja toisen kertaluvun järjestelmissä aikavakion kuluessa vaste on saavuttanut 63 % lopullisesta arvostaan. Korkeamman kertaluvun järjestelmissä aikavakiolla usein ilmaistaan aika jossa askelvasteen verhoikäyrä on saavuttanut vastaavan arvon.



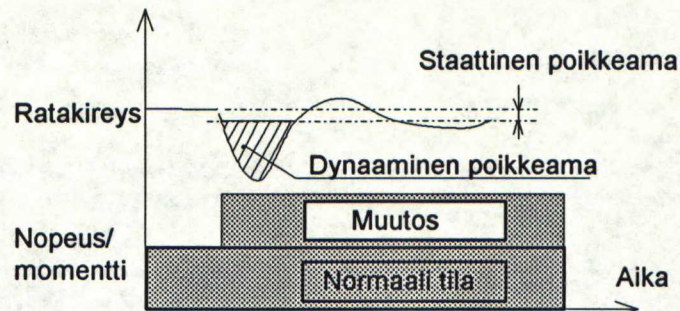
Kuva 5–1. Järjestelmän askelvasteen kriteerit.

Järjestelmän stabiiliudella tarkoitetaan sen kykyä palata tasapainotilaan, mikäli sitä siitä poikkeutetaan. Suljetun takaisinkytketyn systeemin stabiiliutta voidaan kuvata

esimerkiksi järjestelmän vahvistus- ja vaihevaralla, josta voidaan tulkita kuinka paljon järjestelmän vahvistusta voidaan nostaa stabiiliutta menettämättä. Säättöjärjestelmän robustisuudella ymmärretään sen kykyä säilyttää stabiilisuus muuttuvissa prosessiolosuhteissa.

5.1.1 Kireyssäädölle asetettavat vaatimukset

Kireyssäädön ensisijaisena vaatimuksena on robusti toiminta, jolla pyritään välttämään ratakatkot. Säättöjärjestelmän tulee pystyä sietämään ympäristömuutoksia, kuten radan kimmo-ominaisuuksien vaihtelua. Toisaalta kireysmuutoksiin tulee reagoida nopeasti, koska esimerkiksi löystyvä rata voi helposti aiheuttaa tuotantokatkon sotkeutuessaan telojen väliin.



Kuva 5–2. Staattisen ja dynaamisen tarkkuuden määritelmät

Yleensä järjestelmätoimittaja lupaa tietyn spesifikaation mukaisen suorituskyvyn kireyssäädetylle järjestelmälle, jossa on eritelty staattisen ja dynaamisen tilan tarkkuus esimerkiksi kuvan 5–2 mukaisesti. Dynaamisella tilanteella tarkoitetaan yleensä prosessimuutoksia kuten hidastusta ja kiihdytystä, siirtymistä nopeusmuutoksesta tasaiseen nopeuteen, päällistykseen aloitusta tai rullan vaihtoa.

5.1.2 Käytännön viritysongelmat

Päällistyskoneissa, joissa on useita kireyssäätäjiä, virityssajat ovat pitkiä. Käyttöön-oton yhteydessä suoritettava viritys joudutaan toteuttamaan useassa vaiheessa: ensimmäisellä virityksellä pyritään saamaan paperi kulkemaan koneen läpi, jonka jälkeen viritys säädetään eri nopeusalueilla, sekä kokeillaan sen toimivuus kiihdytys- ja hidastustilanteissa. Uusi virityskierros joudutaan tekemään kostutetulla paperilla,

sekä lopuksi vielä päällystyksen yhteydessä. Jotta kone saadaan hyvin ajettavaksi, voi viritykseen kulua jopa kuukausia.

Päällystyskoneilla yleisenä periaatteena kukin ryhmä pyritään eristämään siten, että kireyshäiriöt pysyisivät yhden ratavälin sisällä ja säätäjän korjaukset vaikuttavat vain kyseiseen ryhmään. Perättäisten säätäjien aikavakiot valitaan erisuuruisiksi, jotta ne eivät resonoisi keskenään. Koneen loppupäätä kohti kireyssäätöä löysennetään, jolloin loppupäähän pitävät ryhmät eivät pääse vetämään paperin välityksellä edeltäviä ryhmiä perässään. Kireyssäätäjän tietylle ryhmälle antama nopeuskorjaus voidaan toisinaan kokonaan tai osittain antaa ennakkokorjauksena seuraavalle ryhmälle tai ohjearvoketjuun. Staattisessa kireystason muutoksessa, kuten esimerkiksi lähtörullalta tulevan ratakiireyden muuttuessa, tällainen säätö korjaa kireystason muutoksen läpi koko koneen. Toisaalta dynaamisessa häiriöissä eteenpäin annettu korjaus voi olla itse häiriön aiheuttajana. Käytännössä tilanne on vielä monimutkaisempi, mikäli rata kastuu ja sen kimmo-ominaisuudet siten muuttuvat ryhmien välillä.

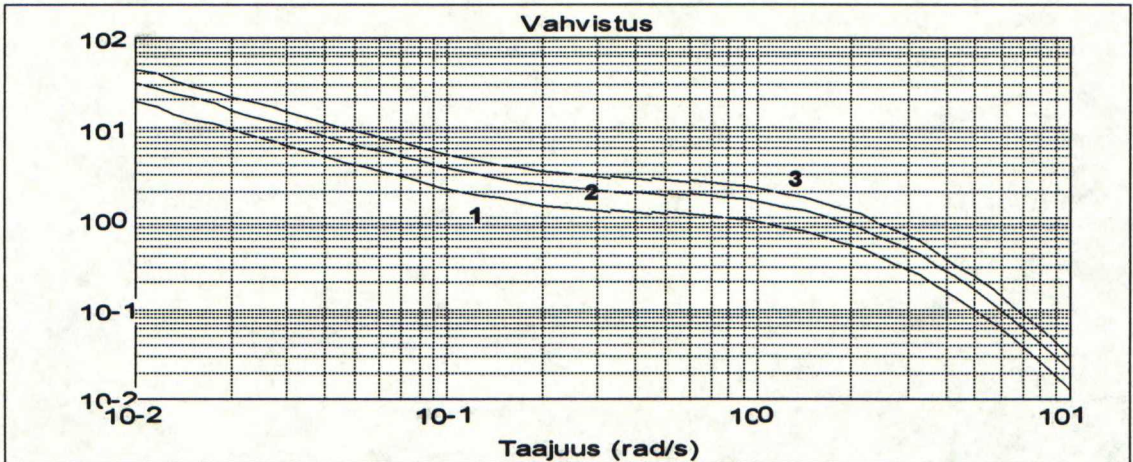
5.2 Kireyssäädön kehittäminen simulointimallin avulla

Simulointi ja säätötekniinen tarkastelu tarjoavat lähestymistavan kireyssäädön ongelmiin, joiden hahmottaminen muutoin voi olla vaikeaa. Simuloinnin avulla säätömenetelmiä voidaan kehittää mahdollisimman pitkälle ilman varsinaisia tehdaskokeita, jolloin monilta suunnitteluvaiheen virheiltä vältytään. Seuraavassa on esimerkkinä tarkasteltu adaptoitua säätöä sekä tilasäätöä sovellettuna kireyssäädettävään systeemiin ja verrattu saatuja tuloksia perinteisellä säädöllä toteutetun järjestelmän vasteisiin.

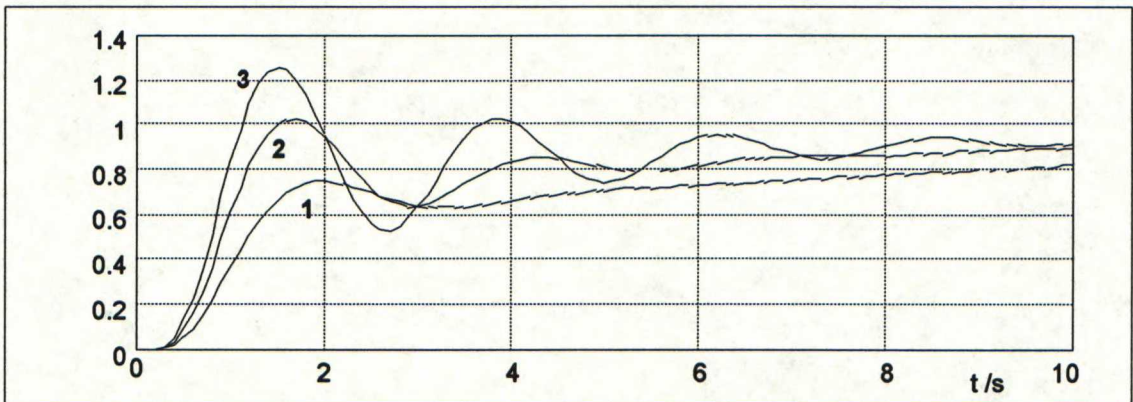
5.2.1 Ratanopeuden suhteen adaptoitu kireyssäätö

Kuvassa 5–3 käyrällä 2 on esitetty simuloitu avoimen kireyssäätöpiirin taajuusvaste tyypillisellä kireyssäätöparametreilla, joilla saadaan sopiva vaste läpi koko nopeusalueen. Esimerkin parametriarvot on otettu tyypillisestä raskaasta kuivatusryhmästä. Tällainen systeemi on kuitenkin herkkä radan kimmo-ominaisuuksien muutoksille, jotka näkyvät vahvistuksena tai vaimennuksena suljetussa säätöpiirissä. Kuvassa on lisäksi esitetty systeemin taajuusvasteet, kun kimmokerroin muuttuu -40% ja $+40\%$ esimerkiksi lajinvaihdon tai kosteusmuutoksen vuoksi, tarkastelunopeus on 20 m/s.

Taajuusvasteesta nähdään, että systeemin rajataajuus vaihtelee tällöin välillä 0.1–1 rad/s. Vastaavat askelvasteet on esitetty kuvassa 5–4.



Kuva 5–3. Avoimen säätöpiirin taajuusvaste. 1) Kimmokerroin pienentynyt 40%, 2) viritystilanne ($K_{pt}=0.8$; $T_{it}=5$ s), 3) kimmokerroin kasvanut 40%.



Kuva 5–4. Suljetun säätöpiirin askelvaste. 1) Kimmokerroin pienentynyt 40%, 2) viritystilanne ($K_{pt}=0.8$; $T_{it}=5$ s), 3) kimmokerroin kasvanut 40%.

Tilannetta voidaan parantaa valitsemalla integrointiajaksi rata-aikavakion $\tau_r=L/V$ suuruinen aika, jolloin systeemin dynaamiset ominaisuudet koko taajuusalueella määräytyvät nopeussäätäjän ominaisuuksien mukaan. Tällöin säätäjän integroiva osa kytkeytyy sarjaan rata-aikavakion kanssa, jolloin koko taajuusalueella saadaan yhtenäisesti laskeva vahvistuskäyrä kuten kuvasta 5–5 voidaan todeta. Tämä edellyttää siis säätöparametrien adaptoimista ratanopeuden mukaan. Suurilla nopeuksilla ja lyhyillä rataväleillä integrointiajaksi saataisiin varsin lyhyt, jolloin sille on syytä asettaa nopeussäätäjän dynamiikkaan sidottu minimiarvo. Näin var-

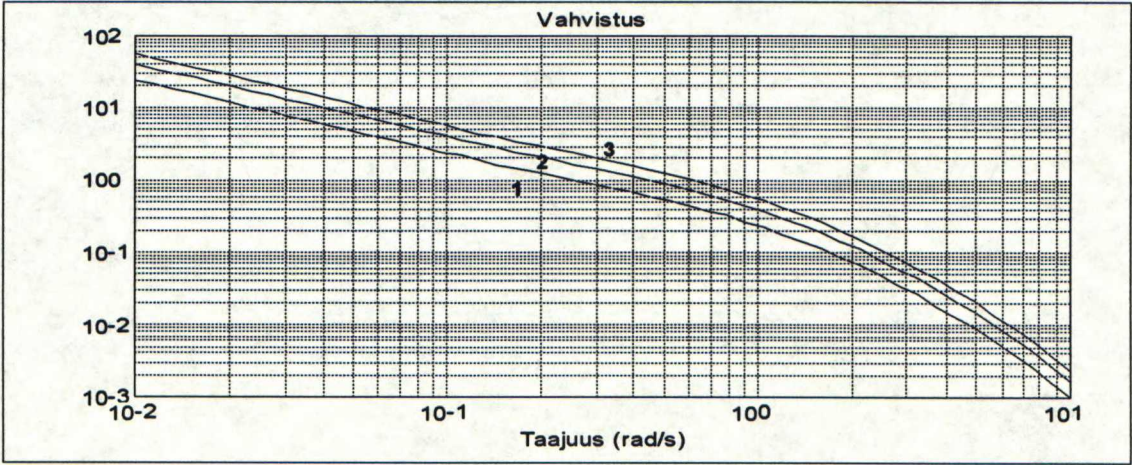
mistetaan, ettei kireyssäätäjä ulompana säätösilmukkana toimi nopeussäätäjää nopeammin. Rajaus voidaan toteuttaa esimerkiksi valitsemalla $T_{itmin} = t_m / 3$, jossa t_m on nopeussäätäjän nousuaika. Tämän jälkeen etsitään sopiva suhteellinen vahvistus K_{pt} , jolla saadaan toivottu askelvaste. Edellä kuvattu menetelmä edellyttää siis nopeuden suhteen adaptoitua säätöä, jonka parametrit määräytyvät ratanopeuden mukaan seuraavasti /35/ :

$V > v_1$
 $V \leq v_1$

$K_{pt} \sim V$
 $K_{pt} = \text{vakio}$

$T_{it} = T_{it \text{ min}}$
 $T_{it} = \tau_r = L/V$

missä siis V on ratanopeus ja $v_1 = 3L / t_m$, nopeus ilmaistuna yksiköissä m/s. Kuvassa 5–6 on esitetty nopeusadaptoidun systeemin kuvan 5–5 vahvistuskäyriä vastaavat askelvasteet kimmokertoimen vaihdellessa. Simulointi on tehty samoilla parametriarvoilla kuin adaptoimattomassa esimerkissä. Vahvistuskäyristä voidaan todeta adaptoidun säädön kyky sietää kimmokertoimen vaihtelua.



Kuva 5–5. Avoimen säätöpiirin taajuusvaste. 1) Kimmokerroin pienentynyt 40%, 2) viritystilanne ($K_{pt}=0.06$; $T_{it}=L/Vs$), 3) kimmokerroin kasvanut 40%.

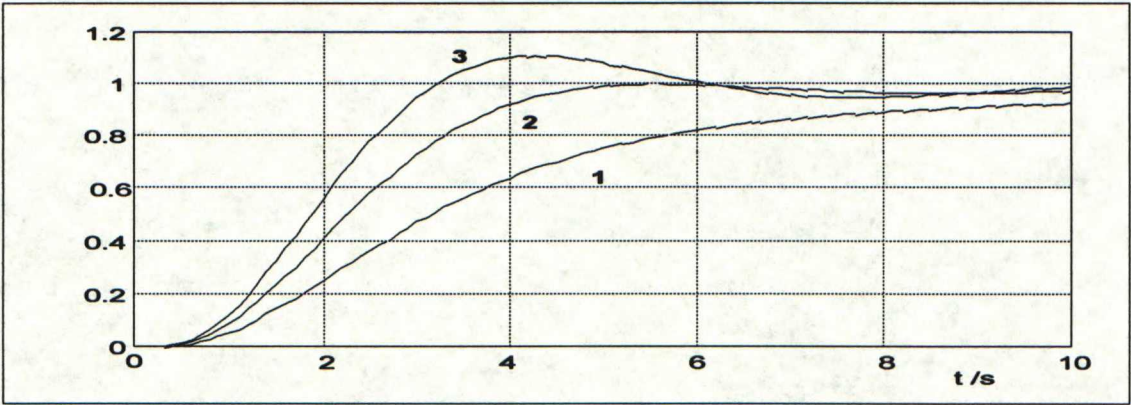
Edelläkuvatusta viritystapaa kutsutaan myös *itseisarvo-optimi*-menetelmäksi, jossa systeemin isoimman aikavakion siirtofunktioon aiheuttama napa kompensoidaan säätäjän siirtofunktion nollalla valitsemalla integrointiajaksi aikavakion suuruinen aika

$\frac{K_{pt}(1+T_{it}s)}{T_{it}s}$
Säätäjä

$\frac{EA_0/V_0}{(1+\tau_r s)}$
Rata

(5.1)

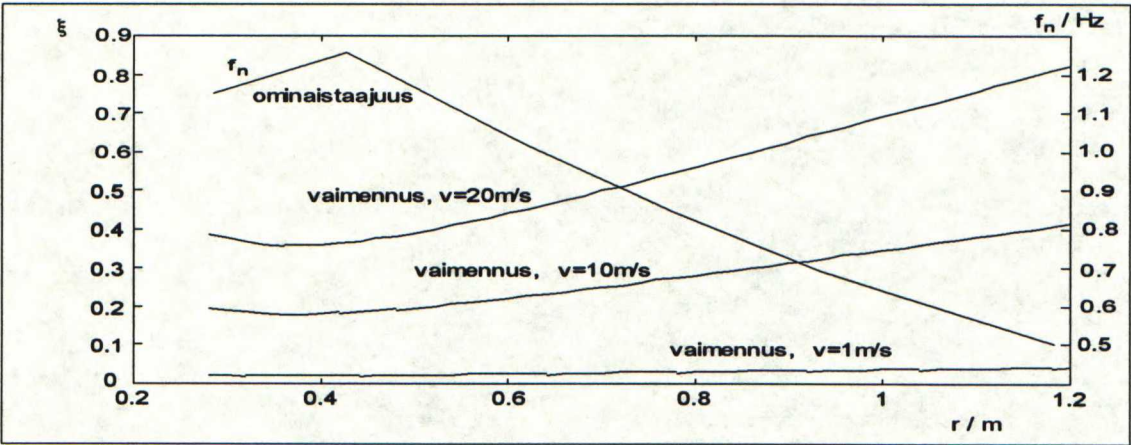
jolloin kyseinen napa siis kumoutuu.



Kuva 5–6. Suljetun nopeusadaptoidun säätöpiirin askelvaste. 1) Kimmokerroin pienentynyt 40%, 2) viritystilanne ($K_{pt}=0.06$; $T_{it}=L/V$ s), 3) kimmokerroin kasvanut 40%.

5.2.2 Rullakoon suhteen adaptoitu kireyssäätö

Edellisessä kappaleessa käsiteltiin tilannetta, jossa säätäjän parametreja muutettiin nopeuden muuttuessa. Rullainkäyttöillä järjestelmän ominaisuudet muuttuvat lisäksi rullan säteen funktiona; vaimennus kasvaa säteen kasvaessa ominaisvärähtelytaajuuden puolestaan alentuessa kuvan 5–7 mukaisesti kuten kappaleessa 3.6.1 todettiin. Käytännössä rullaimen kireyssäätö viritetään tavallisesti puolella rullakoolla, jolloin saavutetaan eräänlainen kompromissiarvo.

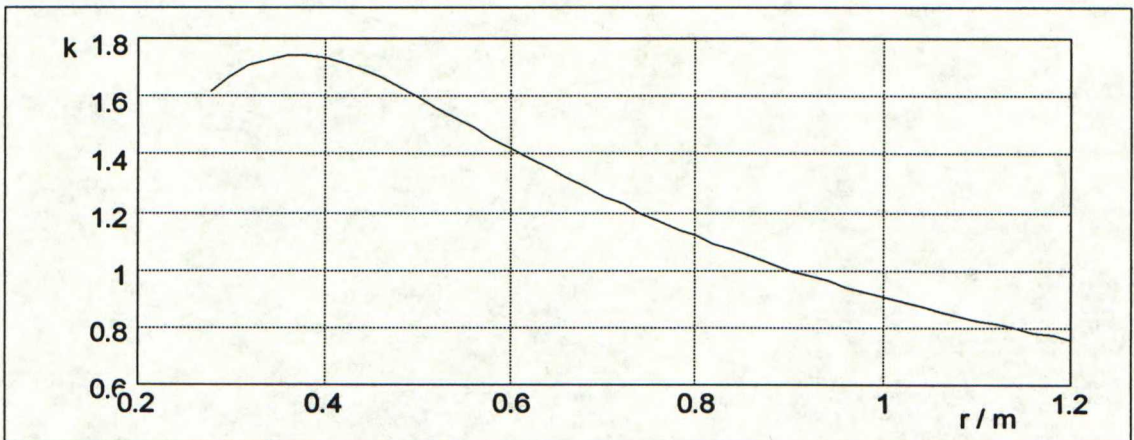


Kuva 5–7. Rullaimen ominaisvärähtelytaajuus ja vaimennus säteen funktiona kappaleen 3.6.1 parametriarvoilla.

Muuttamalla säätöparametreja säteen muutoksen suhteessa, saadaan säätäjä toimimaan säteen suhteen optimaalisemmin koko rullakoon alueella. Käytännössä tällainen adaptiivisuus on melko yksinkertainen toteuttaa ohjelmallisesti. Tällöin rullaimen kireyssäätö voidaan virittää millä tahansa rullasäteellä, ja skaalata säädön vahvistus suhteessa muuttuvaan säteeseen. Riippuvuus on epälineaarinen, ja yhtälöistä 3.11 ja 3.12 voidaan skaalausparametriksi johtaa

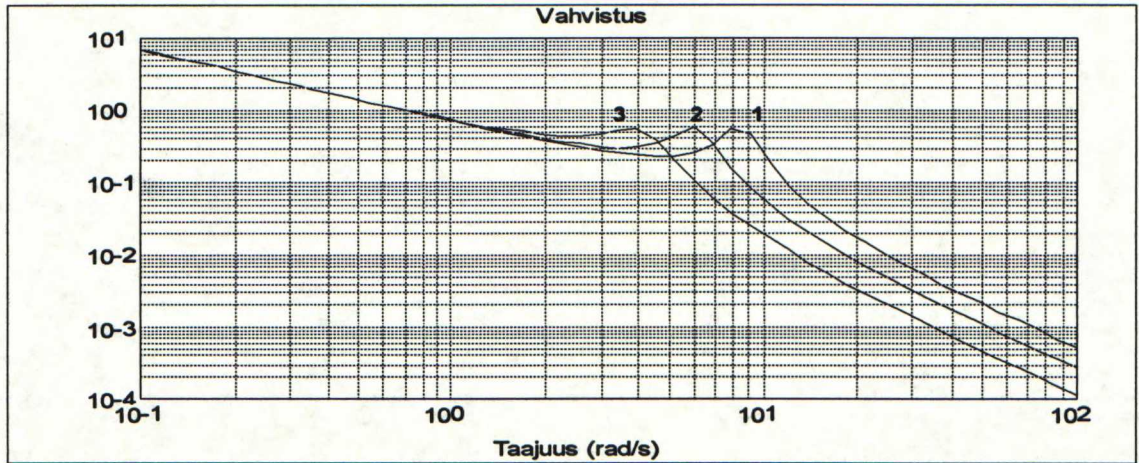
$$k = \frac{r \sqrt{J_{\text{tot},v}}}{r_v \sqrt{J_{\text{tot}}}} \quad (5.2)$$

missä r on rullan säde, J_{tot} kokonaishitausmomentti ja r_v sekä $J_{\text{tot},v}$ vastaavat arvot viritystilanteessa. Kuten adaptoimattomassakin tapauksessa, tulee säätöä viritettäessä ottaa huomioon vaimennuksen nopeusriippuvuus. Kyseiset parametrit on helppo päivittää ohjelmallisesti, toinen mahdollisuus on laskea parametrit konekohtaisesti etukäteen ja taulukoida ne. Kuvassa 5–8 on esitetty skaalauskerroin luvun 3.6.1 esimerkkitapaukselle.

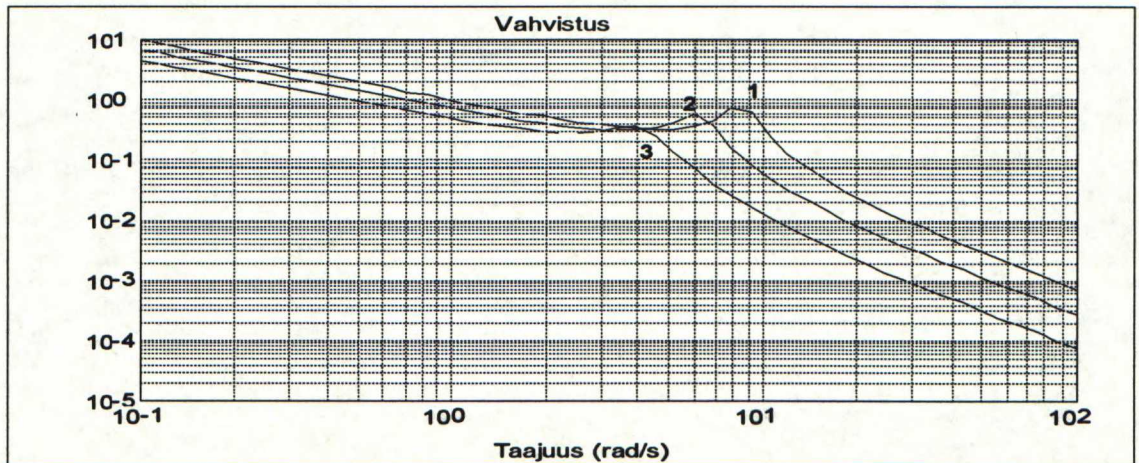


Kuva 5–8. Kireyssäätäjän skaalaus säteen funktiona kappaleen 3.6.1 esimerkkitapaukselle. Säätäjä viritetty säteellä $r=0.9$ m.

Kuvissa 5–9 on esitetty adaptoimattomien säätäjien vahvistus eri rullan säteellä nopeudella 10 m/s, kuvassa 5–10 yhtälöllä 5.1 adaptoidut. Adaptoiduilla saadaan siis viritystilannetta pienemmällä säteellä suurempi vahvistus, suuremmalla säteellä puolestaan säilytetään sama stabiilius.



Kuva 5–9. Avoimen säätöpiirin vahvistus, adaptoimaton säätö. 1) Säde 0.4 m, 2) säde 0.7 m (viritystilanne), 3) säde 1.1 m.



Kuva 5–10. Avoimen säätöpiirin vahvistus, adaptoitu säätö. 1) Säde 0.4 m, 2) säde 0.7 m (viritystilanne), 3) säde 1.1 m.

5.2.3 Tilasäätö

Luvussa 3.4 todettiin radan ja telan muodostavan toisen asteen systeemin

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.3)$$

ja vaimennuksen ξ määräytyvän nopeudesta V_0 seuraavasti

$$\xi = \frac{V_0}{2r} \sqrt{\frac{J}{EA_0 L}} \quad (5.4).$$

Tällöin systeemi tulisi virittää aina pahimman mahdollisen tilanteen mukaisesti, toisin sanoen pienellä nopeudella, jolloin systeemin luonnollinen vaimennus on vähäisin. Toinen tapa on soveltaa järjestelmään *tilasäättöä*, jolla muokataan systeemin ominaisuuksia siten, että vaimennus on aina optimaalinen. Kuten kappaleessa 3.4 todettiin, kun vaimennus $\xi > 1/\sqrt{2}$, ei resonanssihuippua ja siten ominaisvärähtelyä muodostu.

Tilatakaisinkytkennässä käytetään hyväksi kaikkia systeemin mitattavia tiloja hyödyksi, myös ei-mitattavien tilojen käyttö on mahdollista käyttämällä nk. *tila-havaitsijaa*. Tutkittava järjestelmä voidaan esittää tilaesitysmuodossa

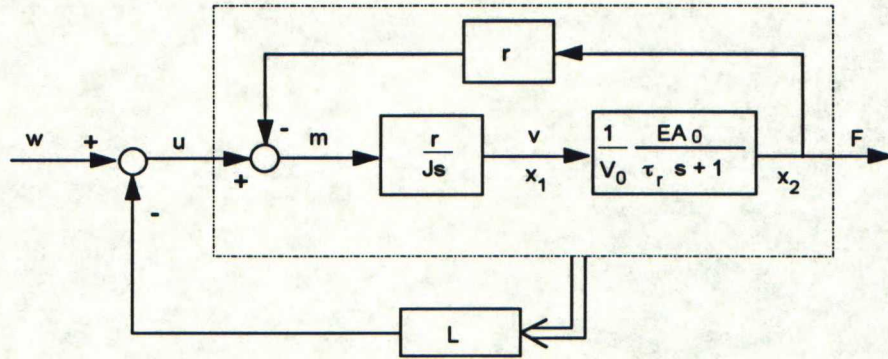
$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (5.5)$$

Tilaesitys kuvaa järjestelmän tilaa tiettyinä ajanhetkenä, ja voidaan johtaa esimerkiksi systeemin fysikaalisista yhtälöistä [36]. Kappaleen 3.4 ratavoiman ja akselimomentin välinen siirtofunktio voidaan esittää tilamatriisina

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & -r^2/J \\ EA_0/(V_0\tau_r) & -1/\tau_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r/J \\ 0 \end{pmatrix} w \\ y &= (0 \quad 1) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.6)$$

jossa tilat on valittu $x_1 = \Delta v$ ja $x_2 = y = \Delta F$ ja w on nopeus- tai kireyssäätäjän antama momenttiohje ja \dot{x} tarkoittaa suureen aikaderivaattaa.

Muodostetaan systeemille kuvan 5–11 mukainen tilatakaisinkytkentä, jossa $L = (l_1 \quad l_2)$ ja l_1 ja l_2 takaisinkytkennän vahvistukset nopeudelle ja ratakireydelle vastaavasti.



Kuva 5–11. Tilatakaisinkytketty systeemi

Kuvan systeemille saadaan

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -r^2/J \\ EA_0/(V_0\tau_r) & -1/\tau_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r/J \\ 0 \end{pmatrix} (l_1 \ l_2) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r/J \\ 0 \end{pmatrix} w \quad (5.7)$$

$$= \begin{pmatrix} -l_1 r/J & -(r^2 + l_2 r)/J \\ EA_0/(V_0\tau_r) & -1/\tau_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r/J \\ 0 \end{pmatrix} w$$

Tilamatriisimuodossa olevan järjestelmän ominaisarvot saadaan määritettyä yhtälöstä

$$\det(\lambda I - (A - BL)) = 0 \quad (5.8)$$

jossa I on 2x2 yksikkömatriisi. Karakteristiseksi yhtälöksi voidaan edelleen johtaa

$$\lambda^2 + (l_1 r/J + 1/\tau_r)\lambda + EA_0(r^2 + l_2 r)/(V_0 J \tau_r) \quad (5.9)$$

Koska ratavoiman F mittaaminen on häiriöllinen ja viivästynyt, valitaan $l_2=0$. Takaisinkytkentäparametri l_1 vaikuttaa nopeusmittauksen takaisinkytkentään. Valitsemalla l_1 sopivasti voidaan vaikuttaa systeemin vaimennukseen. Kirjoittamalla karakteristinen yhtälö muotoon

$$\lambda^2 + 2\xi\omega_n\lambda + \omega_n^2 \quad (5.10)$$

ja valitsemalla vaimennukseksi $1/\sqrt{2}$ saadaan

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{\sqrt{V_0}}{2} \frac{\tau_r I_1 r + J}{\sqrt{EA_0 J \tau_r r^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \Rightarrow I_1 &= \frac{\sqrt{EA_0 J L}}{L} - \frac{J}{L r} V_0\end{aligned}\tag{5.11}$$

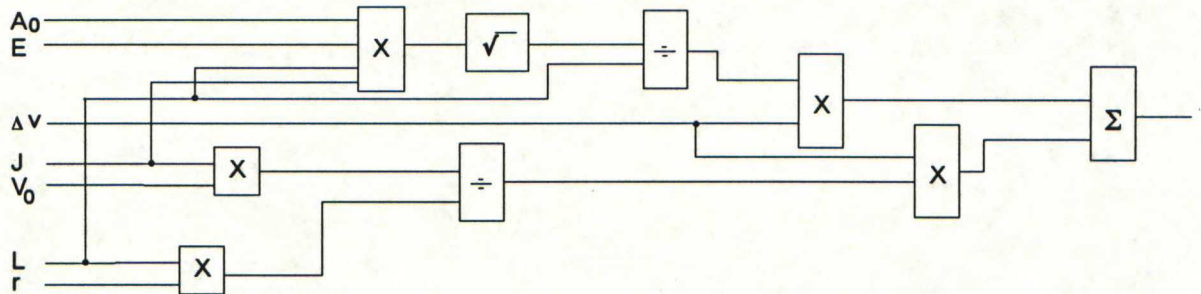
Edellisen mukaisella tilatakaisinkytkennällä saadaan siis optimaalinen vaimennus koko nopeusalueella.

Tilatakaisinkytkennässä vaaditaan parametritietoja, jotka eivät usein ole tarkasti tiedossa tai joiden vaihteluväli voi olla suuri. Näitä ovat radan kimmomoduuli E sekä pitävä rataväli L . Yleensä hitausmassat saadaan laskettua melko hyvällä tarkkuudella, samoin rullaimilla rullan säde. Vaimennusta saadaan parannettua kuitenkin merkittävästi, vaikka todellisten ja takaisinkytkennässä saatujen parametrien kohdalla olisikin heittoa, kuten seuraavan kappaleen simuloinneista voidaan todeta. Rajoitavampia tekijöitä ovat säätöjärjestelmän viiveet. Tämän vuoksi tilatakaisinkytkentä olisi edullisin toteuttaa ryhmäsäätäjässä nopealla aikatasolla momenttitakaisinkytkentänä. Ylemmän tason sovellusohjaimesta päivitetään kerroinparametrit, jolloin säätö on toteutuskelpoinen myös rullaimilla päivittämällä rullan säde- ja hitausmassaparametreja, joita sovellusohjelmassa muutoinkin lasketaan.

Tilasäätöä on perinteisesti käytetty esimerkiksi servo-ohjauksessa asentosäädössä, jolloin asentotiedon lisäksi on käytetty nopeustietoa säätöominaisuuksien parantamiseksi. Periaatteessa tilatakaisinkytkentä ei edellytä edes prosessimallin johtamista tilamuotoon, vaan suunnittelu voidaan toteuttaa esimerkiksi CAD-suunnittelutyökalua käyttäen prosessimittauksista identifioitua systeemimallin perusteella.

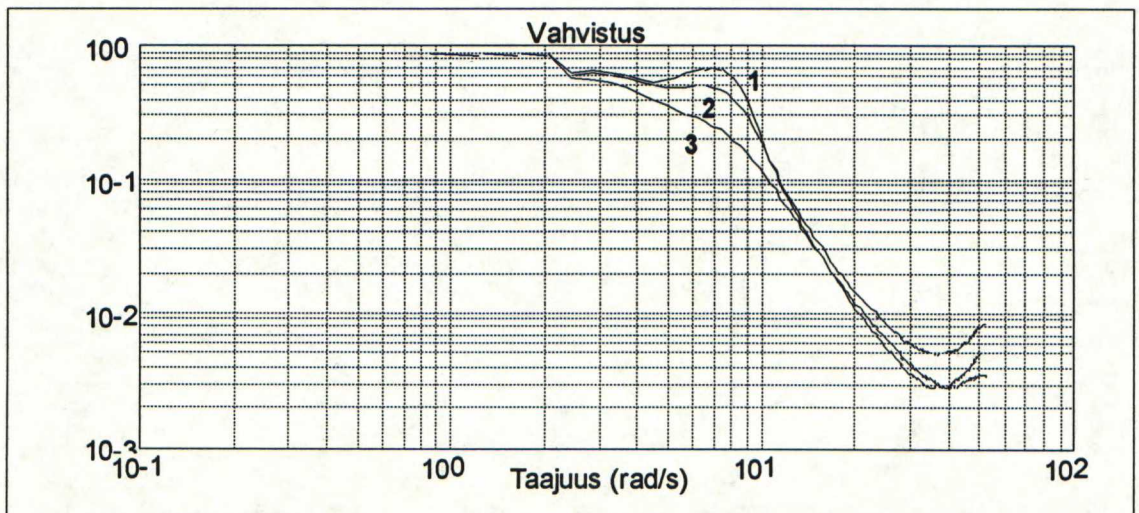
5.2.3.1 Simuloinnit tilasäädöllä

Tilasäätöä simuloitiin edellisessä kappaleessa 4.6 esitettyyn aukirullaimeen suurella rullansäteellä vastaavin parametriarvoin kuvan 5–12 mukaisella tilasäätäjällä

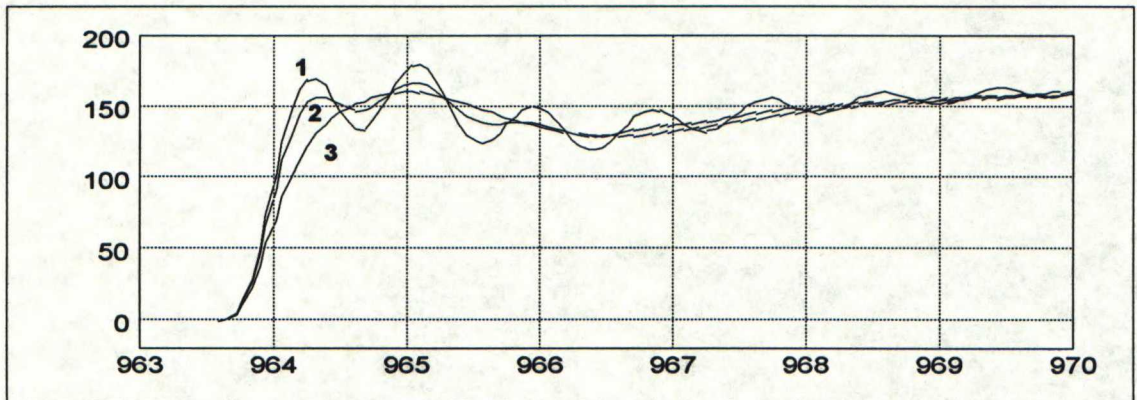


Kuva 5–12. Tilasäätäjän lohkokaavioesitys.

Simulointi tehtiin sekä ideaalisilla parametriarvoilla sekä oletuksella, että kimmokerroin EA_0 oli arvioitu virheellisesti kymmenesosaksi todellista. Tulokset on esitetty kuvissa 5–13 ja 5–14. Vahvistuskäyrästä nähdään tilasäätäjän kyky vaimentaa syntyvää resonanssihiippiä. Myös virheellisellä kimmokertoimen arvolla saadaan selvä paranus, kuten myös askelvasteesta voidaan todeta.



Kuva 5–13. Simuloidut kireyssäädön vahvistuskäyrät. 1) Tavallinen säätö, 2) tilasäätö, jossa virheellinen kimmokerroin, 3) ideaalinen tilasäätö



Kuva 5–14. Simuloidut askelvasteet. 1) Tavallinen säätö, 2) tilasäätö, jossa virheelinen kimmokerroin, 3) ideaalinen tilasäätö

5.3 Muut säätömenetelmät

Tavallista PI(D)–säätöä käytetään teollisuudessa sen yksinkertaisuuden vuoksi. Säätäjä on suhteellisen helppo virittää, eikä välttämättä vaadi tarkkaa prosessituntemusta. Tämän lisäksi on kehitetty joukko säätömenetelmiä, jotka vaativat tarkempaa tietoa prosessin käyttäytymisestä ja joiden viritys on sidottu tunnettuun prosessimalliin. Ratakireyden häiriölliseen mittaukseen olisi eräs ratkaisu tilasuotimen eli ns. Kalman suotimen käyttö. Suodatin perustuu mittauksen kautta saadun tiedon sekä prosessin tiloista fysikaalisen mallin kautta laskettuun suureen määrittämiseen. Toimiakseen toivotulla tavalla tällaisen suotimen pitäisi samalla periaatteessa estimoida radan kimmokerrointa sekä ratavälille saapuvan radan tulokireyttä.

Derivoivan säädön toteutuksen suurimpana esteenä on derivaatan laskeminen perinteisellä menetelmällä näytejonosta. Tällöin kireysmittauksen vaikeasti suodatettavat häiriöt aiheuttavat teräviä muutoksia ohjaukseen.

Erään kehittämismahdollisuuden tarjoaa sumea säätö, jossa ohjaus perustuu ihmisen päättelymekanismia vastaaviin sääntöihin. Sumeaa logiikkaa voidaan soveltaa esimerkiksi epäjatkuvuustilanteissa perinteisen säätäjän rinnalla ohjaamassa säätäjän toimintaa tilanteissa, joista säätäjä yksin ei selviä riittävän hyvin.

Eräänä periaatteena säätöjärjestelmän kehittämiselle monimutkaisessa prosessissa on kuitenkin järjestelmän yksinkertaisuus. Ylimääräinen viritystermi tuo prosessiin

yhden muuttujan lisää ja kasvattaa yleensä sitä kautta viritykseen kuluvaa aikaa. Kehittyneemmän säätöjärjestelmän tulisi aina olla ulospäin riittävän yksinkertainen sekä robusti ja toteutettu siten, ettei loppukäyttäjän tarvitse olla säätötekniikan asiantuntija.

5.4 Pohdintoja

Edellä on esitetty simuloinnin mahdollisuuksia suunnittelun ja säätömenetelmien kehittämisen apuvälineenä. Simulointi tarjoaa käyttökelpoisen lähestymistavan ongelmiin, joita voi olla tutkittavan järjestelmän monimutkaisuuden vuoksi vaikeaa hahmottaa. Kasvattamalla prosessituntemusta päästään simuloinnilla tuloksiin, jotka ovat lähempänä systeemin todellista käyttäytymistä. Simuloinnilla voidaan myös tutkia epälineaaristen järjestelmien käyttäytymistä.

Simulointimallia voidaan käyttää kireyssäädön lähtöparametrien määrittämiseksi etukäteen pyrkimyksenä lyhentää käyttöönotossa viritykseen kuluvaa aikaa. Mallin soveltuvuus laajempaan kireyssäädettyyn systeemiin vaatii todentamista käytännön kokeiden avulla. Simulointimallin käyttöön liittyy kuitenkin tiettyjä rajoituksia: todellisessa järjestelmässä esiintyvää telan ja radan välistä luistoa on vaikeaa ennakoida etukäteen, samoin kitkojen suuruutta sekä radan kosteusmuutosten vaikutusta kimmo-ominaisuuksiin.

Työn yhteydessä tehtiin mittauksia tiedonkeruukortin ja PC:n avulla, yleensä ongelmatilanteissa varsinkin nopeiden ilmiöiden kuten akselivärähtelyn ollessa kyseessä tietoa rekisteröidään piirturin avulla. Kerättäessä mittausdataa sähköisessä muodossa, helpottuu datan analysointi jälkikäteen, samoin dokumentointi. Käytännössä mittalaitteen tulee lisäksi olla sellainen, että mittausta pystytään samalla seuraamaan. Tällöin voidaan välittömästi varmistaa, että tutkittava ilmiö saatiin tallennetuksi ja mahdollisilta uusintamittauksilta vältetään.

Ratakireyshäiriöitä sekä akselivärähtelyilmiöitä mitattaessa häiriölähteen jäljille voidaan päästä helpommin tutkimalla mittauksen sisältämää taajuusinformaatiota ja vertaamalla sitä esimerkiksi laskettuihin ominaisvärähtelytaajuuksiin ja simuloituihin vasteisiin ja toimimalla näin saadun tiedon pohjalta.

6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli muodostaa käyttökelpoinen simulointimalli paperiradan kireyssäädölle monimoottorikäytöissä. Graafisen ohjelmoitavan lohkoista koostuvan mallin avulla voidaan joustavasti muodostaa erilaisia paperinjalostuskoneita kuvaavia malleja. Mallin avulla voidaan havainnollistaa ratakireyden ilmiöitä erilaisissa muutostilanteissa, simuloimalla voidaan tutkia erilaisten säätötoimenpiteiden vaikutusta järjestelmän hallintaan ja luoda runko monimutkaisen, useasta säätöpiiristä koostuvan paperinjalostuskoneen virityksen nopeuttamiseksi.

Työn alussa esiteltiin lyhyesti paperintuotantokoneita toimintaperiaatteineen. Tämän jälkeen on käsitelty linjakäyttöjen ohjaus- ja toimintaperiaatteita momentti-, nopeus- ja kireyssäädön osalta. Toisen luvun lopussa tutustuttiin tarkemmin kireysmittauksen ongelmiin ja ratkaisuihin.

Kolmannessa luvussa esitettiin teoreettinen pohja ratakireyden muodostumiselle. Ratakireyden dynamiikan ymmärtämiseksi käsiteltiin tarkemmin radan ja telan välistä vuorovaikutusta sekä ratakireyden käyttäytymistä yhden ja useamman telaparin muodostamassa systeemissä staattisessa sekä dynaamisessa tilanteessa. Radan ja telan todettiin muodostavan värähtelevän systeemin, jolle esitettiin Laplace-tason siirtofunktio sekä yhtälöt järjestelmän luonnollisen ominaistajuuden ja vaimenuksen määräytymiselle. Tämän kaltainen systeemi suljetussa säätöpiirissä on altis ominaistajuisille värähtelyille. Luvun lopussa esitettiin linjakäytöissä esiintyvät muut tyypilliset häiriölähteet, jotka voidaan jakaa ajotoimenpiteistä aiheutuviin sekä mekaniikan aiheuttamiin häiriöihin.

Neljännessä luvussa esitettiin linjakäytön kireydenhallinnan Matlab-ohjelmistolla toteutettu simulointimalli. Prosessimallin perustaksi valittiin järjestelmän fysikaaliset riippuvuudet, ohjausjärjestelmän mallilla kuvattiin käytännössä toteutettuja säätöjärjestelmiä. Ohjelmistolla voidaan simuloida useamman telaparin muodostamaa kokonaisuutta. Kappaleessa pohdittiin myös simuloinnin rajoituksia, kuten todellisen järjestelmän tekijöitä, joita on vaikea sisällyttää prosessin matemaattiseen malliin. Mallia verrattiin yhden ryhmän osalta aukirullaimelta käytännön mittauksista saatuun tietoon sekä taajuus- että aikatasossa. Mittausdatasta löydettiin järjestelmälle tyypillinen ominaisvärähtelytaajuus, joka voitiin todeta myös simulointimallin avulla.

Viidennessä luvussa esitettiin simulointiohjelman käyttömahdollisuuksia tutkimalla nopeusadaptoidun kireyssäädön sekä rullainkäytöissä mahdollisen rullakokoon sopeutetun säädön ominaisuuksia ja vertaamalla niitä perinteisiin säätötapoihin. Lisäksi esitettiin kireyssäätöön soveltuvan tilasäädön periaate sekä simuloitiin tilasäädettyä järjestelmää. Lopuksi pohdittiin simulointimallin käyttömahdollisuuksia kireyssäädön parametrien etukäteismäärittelyssä sekä työssä käytetyn mittausjärjestelyn soveltuvuutta ongelmatilanteissa.

LÄHDELUETTELO

1. Karttunen, M., Komulainen, P. Pituusleikkaus ja rullaus. In: Arjas, A. (toim.). Paperin valmistus, osa 2. 2. painos. Turku 1983. Suomen paperi-insinöörien yhdistys r.y. S. 1223–1248.
2. Haapanen, P. Päälystysmenetelmät ja -koneet. In: Arjas, A. (toim.). Paperin valmistus, osa 2. 2. painos. Turku 1983. Suomen paperi-insinöörien yhdistys r.y. S. 1293–1320.
3. Luomi, J. Sähkövoimatekniikka. Opetusmoniste Svt-17.44, TKK. 1988. 173 s.
4. Niiranen, J. Sähkökäytön digitaalinen ohjaus. Opetusmoniste Svt-81-150. TKK. 1993. 269 s.
5. Leinonen, R. Paperiteollisuuden monimoottorikäytön hajautettu ohjausjärjestelmä ja sen tiedonsiirto. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, 1991. 95 s.
6. Sami star SAFRVG 4.00 Manual. Sami-taajuusmuuttajan ohjekirja. Helsinki, 1991. ABB Strömberg Drives Oy, Tehoelektroniikka. 252 s.
7. Keskustelu M. Kauhasen ja R. Virtasen kanssa 1.10.1993. ABB Strömberg Drives Oy, Tehoelektroniikka.
8. Erkkilä, I. NDS-specification, the operation of digital speed control. Helsinki, 1992. Julkaisematon. ABB Strömberg Drives Oy, Industrial Drive Systems. 4 s.
9. Kheboian, G.I. Drive systems for off-machine coaters. Tappi Journal. 73(1990)April, s. 137–147.
10. Joensuu, H. Sähkökäytön säätöjärjestelmään liittyviä toimintoja. Pituusleikkuri. Helsinki, 1992. Julkaisematon. ABB Strömberg Drives Oy, Industrial Drive Systems. 17 s.

11. Erkkilä, I., Talvitie, T. Positioning and mounting of tension transducers. Helsinki 1992. Julkaisematon. ABB Strömberg Drives Oy, Industrial Drive Systems. 5 s.
12. Manual for PRESSDUCTOR pillowblock web tensionmeter. Västerås, 1989. ABB Automation AB. 67 s.
13. Kajander, V. Paperiradan kireydenhallinta monimoottorikäytössä. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, 1988. 75 s.
14. Nordman, L., Aaltonen, P. Paperin rakenne. In: Arjas, A. (toim.). Paperin valmistus, osa 1. 2. painos. Turku 1983. Suomen paperi-insinöörien yhdistys r.y. S.169– 206.
15. Nordman, L. Paperin reologia ja lujuus. In: Arjas, A. (toim.). Paperin valmistus, osa 1. 2. painos. Turku 1983. Suomen paperi-insinöörien yhdistys r.y. S. 207– 219.
16. Taguchi, T., Morimoto, K., Terada, Y., Sakamoto, Y. Web behaviour on newspaper rotary press. Technical Review–Mitsubishi Heavy Industries. 22(1985)3, s. 303–308.
17. Nordman, L., Levlin, J-E., Visti, J. Kuivatuksen vaikutus paperirainan ominaisuuksiin. In: Arjas, A. (toim.). Paperin valmistus, osa 1. 2. painos. Turku 1983. Suomen paperi-insinöörien yhdistys r.y. S. 705–724.
18. Brandon, C.E. Properties of paper. In: Casey, J.P. (toim.). Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology, Vol. III, 3 edition. New York, 1981. John Wiley & Sons. S. 1715–1972.
19. Byrd, Von L. Predicting paper properties during production. Paper Technology and Industry. 28(1987)7, s. 654–657.
20. Brandenburg, G. The dynamics of elastic webs threading a system of rollers. Newspaper technology. (1972) Sept., s. 12–25.
21. Bahnbannungsregelungen an schnellaufenden On – und Offline – Streichanlagen. 1991. Tutkimusraportti, julkaisematon. 17 s.

22. Lin, P., Hudyma, E. Modeling of web tension response and its application to newspaper printing. 43rd annual TAGA conference, May 5–6, 1991. Rochester, New York, s. 566–606.
23. Kessler, G., Brandenburg G., Schlosser, W., Wolfermann, W. Struktur und Regelung bei Systemen mit durchlaufenden elastischen Bahnen und Mehrmotoren-Antrieben. Regelungstechnik, 32(1984)8, s.251–266.
24. Ortman, B., Donigian, D. Mechanism and prevention of coat weight nonuniformity due to high speed blade coating. Tappi Journal. 75(1992)September, s. 161–169.
25. Keskustelu suunnittelija T. Talvitien kanssa 29.12.1993. ABB Strömberg Drives Oy, Industrial Drive Systems.
26. Bentley, J., Kheboian G. Mechanical factors that affect drive system performance. Tappi Journal. 52(1969)June, s. 1084–1091.
27. Soininen, M. Paperikoneen höyry- ja lauhdejärjestelmät. In: Arjas, A. (toim.). Paperin valmistus, osa 2. 2. painos. Turku 1983. Suomen paperi-insinöörien yhdistys r.y. S. 811–829.
28. Lalu, J. Joustava-akselisen epätahtimoottorikäytön adaptiivinen nopeussäätö. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 1991. 108 s.
29. Adams, R. The influence of rolls and reels on flutter and windage. Tappi Journal. 75(1992)November, s. 215–222.
30. Selkäinaho, J. Identifiointi- ja estimointimenetelmät. Opetusmoniste kurssiin Aut-84–125. TKK. 1989. 51 s.
31. Ljung, L. System identification toolbox for use with Matlab. User's guide. The MathWorks, Inc., 1991. 205 s.
32. Leigh, J.R. Control theory, a guided tour. Wiltshire, UK, 1992. Peter Peregrinus Ltd. 180s.

33. Ljung, L. System identification. Theory for the user. New Jersey, 1987. Prentice Hall, Inc. 519 s.
34. Gustavsson, I., Ljung, L., Söderström, T. Identification of processes in closed loop – identifiability and accuracy aspects. Automatica. 13(1977)1. S. 59–75.
35. Galic, J. Sisäinen tutkimusraportti kireyssäädön dynamiikasta. Julkaisematon. ABB Power Electronics Division, Västerås.
36. Glad, T., Ljung, L. Reglerteknik–Grundläggande teori, 2. painos. Lund, 1989. Studentlitteratur. 251 s.

RATAKIREYDEN ASKELVASTEKOE

LIITE 1

Kaukas KK2, 12.1.1993

